



UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE CATALUNYA
BARCELONATECH

**Escola Superior d'Enginyeries Industrial,
Aeroespacial i Audiovisual de Terrassa**

Máster Universitario en Ingeniería de Sistemas Automáticos y Electrónica Industrial

Trabajo Final de Máster

Estudio del Diseño de un Circuito Driver para Inversor Basado en SiC Aplicado a Cocinas de Inducción

Por: Alexander Vinicio Bermeo Maldonado

Director: Juan Mon Gonzales

Co-Dierector: Manel Lamich Arocas

Junio 2019

AGRADECIMIENTOS

Quiero dedicar este trabajo principalmente a mi familia, ya que siempre han confiado en mí; y gracias al apoyo que desde siempre me brindaron, hoy he alcanzado una meta más.

Mis agradecimientos muy sinceros para los directores Juan y Manel, por los conocimientos impartidos y por involucrarse por completo para alcanzar los objetivos de este trabajo.

Además, quiero agradecer de una forma muy especial a la Secretaría de Educación Superior, Ciencia, Tecnología e Innovación (SENESCYT) del Ecuador, por otorgarme la beca que hizo posible financiar la totalidad de los costos, de estudios y estancia, durante todo el tiempo que duró el Master.

RESUMEN

En el presente trabajo se ha planteado el diseño e implementación de un circuito driver para cocina de inducción, que sea capaz de controlar la conmutación de un MOSFET SiC de banda ancha, que reduzca al mínimo posible los picos de corriente en la conmutación de dicho MOSFET y que trabaje en los rangos de frecuencias necesarios para calentar recipientes tanto de materiales ferromagnéticos como de aluminio.

Para alcanzar los objetivos planteados se ha empezado por la elección de los componentes necesarios. Luego se ha simulado el comportamiento deseado del circuito driver. Seguido a ello se ha diseñado la PCB de tal forma que se reduzcan al mínimo las inductancias y capacitancias parásitas que podrían afectar al funcionamiento.

Posterior al diseño se ha construido el circuito agregando los componentes por etapas y comprobando en cada etapa que se obtenga el comportamiento esperado. Una vez incorporados todos los componentes al circuito, se realizaron las pruebas experimentales para diferentes cargas y diferentes puntos de trabajo. Primero se probó el sistema con cargas resistivas, posterior a ello se conectó la bobina de inducción y se comprobó el funcionamiento con un recipiente ferromagnético, se analizaron los consumos de corriente y diferentes parámetros en varios niveles de tensión de ingreso, además se comprobó con diferentes señales de control, sin modular y moduladas. Al realizar estas pruebas se encontraron los parámetros que mejor eficiencia entregan en el calentamiento del recipiente de material ferromagnético.

Finalizadas las pruebas con el recipiente ferromagnético, se realizaron las pruebas con un recipiente de aluminio, en este caso se ajustaron los parámetros y se encontró el punto de trabajo, así como el tipo de señal de control necesaria para que el calentamiento de este recipiente entregue la mayor eficiencia posible, dentro de las limitaciones de nuestro driver y del transistor SiC.

ÍNDICE DE CONTENIDOS

Lista de Figuras	6
Lista de Tablas	10
1 INTRODUCCIÓN	12
1.1 Justificación	12
1.2 Objetivos	12
1.2.1 Objetivo Principal	12
1.2.2 Objetivos específicos	12
2 ESTADO DEL ARTE	13
2.1 Principios del Calentamiento por Inducción	13
2.2 Cocinas de Inducción	15
2.2.1 Ventajas y Desventajas de las Cocinas de Inducción Actuales	17
2.3 Inversores Cuasi-resonantes	17
2.4 Topología de inversor Single Switch ZVS.....	17
3 DISEÑO DEL SISTEMA	19
3.1 Simulaciones del comportamiento de la topología seleccionada	19
3.2 Principales Componentes del Circuito Driver Desarrollado.	19
3.2.1 MOSFET SiC CMF20120.....	19
3.2.2 Driver SI8271AB-IS.....	20
3.2.3 Traco Power THN 15-1213	20
3.2.4 Traco Power TEN 4-2410	20
3.3 Diseño de la PCB	21
4 RESULTADOS EXPERIMENTALES.....	26
4.1 Evaluación del circuito driver sin transistor SiC.....	26
4.1.1 Consumo del circuito driver para diferentes frecuencias de señal de control.....	26
4.1.2 Búsqueda de la mejor respuesta en el driver.....	29
4.2 Respuesta del Sistema con Carga Resistiva.....	34
4.2.1 Pruebas con carga Resistiva y señal de entrada no modulada.....	34
4.2.2 Pruebas con carga Resistiva y señal de entrada modulada	38
4.2.3 Análisis de resultados de pruebas con carga Resistiva	41
4.3 Evaluación del sistema completo con recipiente ferromagnético	41
4.3.1 Pruebas con señal de entrada no modulada.....	42

4.3.2 Pruebas con señal de entrada modulada 30 pulsos a 25 MHz ciclo de trabajo 55% y 23 KHz ciclo de trabajo 30%.....	45
4.3.3 Pruebas con señal de entrada modulada 35 pulsos a 25 MHz ciclo de trabajo 55% y 23 KHz ciclo de trabajo 30%.....	48
4.3.4 Pruebas con señal de entrada modulada 40 pulsos a 25 MHz ciclo de trabajo 55% y 23 KHz ciclo de trabajo 30%.....	49
4.3.5 Pruebas con señal de entrada modulada 45 pulsos a 25 MHz ciclo de trabajo 55% y 23 KHz ciclo de trabajo 30%.....	51
4.4 Evaluación del sistema completo con recipiente de aluminio.....	51
4.4.1 Pruebas con señal de entrada no modulada de 100 KHz ciclo de trabajo 50%.....	52
4.4.2 Pruebas con señal de entrada modulada 20 pulsos a 25 MHz ciclo de trabajo 55% y 100 KHz ciclo de trabajo 50%	53
4.5 Análisis de la Eficiencia del Sistema.....	54
4.5.1 Potencia del sistema con señal de control no modulada y carga recipiente ferromagnético.....	54
4.5.2 Potencia del sistema con señal de control modulada y recipiente ferromagnético	56
4.5.3 Potencia del sistema con señal de control no modulada y recipiente de aluminio.....	60
4.5.4 Potencia del sistema con señal de entrada modulada y recipiente de aluminio.....	62
4.6 Distribución de Temperatura sobre los Componentes del Sistema en los Diferentes Casos de Operación.....	64
4.6.1 Temperatura del sistema con señal de control no modulada y carga de recipiente ferromagnético.....	65
4.6.2 Temperatura del sistema con señal de control modulada y carga de recipiente ferromagnético.....	66
4.6.3 Temperatura del sistema con señal de control no modulada y recipiente de aluminio	67
4.6.4 Temperatura del sistema con señal de control modulada y recipiente de aluminio.....	69
5 CONCLUSIONES.....	71
6 TRABAJOS FUTUROS	72
7 REFERENCIAS	72
8 ANEXOS	74
8.1 Esquemático del diseño de la PCB	74

8.2 Listado de Componentes del Circuito Desarrollado	75
8.3 Capas de la PCB	76
8.3.1 Capa Superior	76
8.3.2 Capa Inferior	77
8.4 Código Matlab para la generación de señales de control.....	78

Lista de Figuras

Figura 1. Inductancia serie equivalente de la carga (bobina y recipiente) en función de la frecuencia, para recipientes de distintos materiales. Recuperado de (Semiconductor, O., 2015)	14
Figura 2. Resistencia serie equivalente de la carga (bobina y recipiente) en función de la frecuencia, para recipientes de distintos materiales. Recuperado de (Semiconductor, O., 2015)	15
Figura 3. Estructura de una cocina de inducción (etapa de potencia).....	16
Figura 4. Diagrama de bloques completo de una cocina de inducción.....	16
Figura 5. Diagrama del Circuito del Inversor single-switch. Recuperado de (Skała, A., & Waradzyn, Z., 2016).	18
Figura 6. Circuitos equivalentes del inversor en Modo I y Modo II. Recuperado de (Skała, A., & Waradzyn, Z., 2016).	18
Figura 7. Simulación de la respuesta esperada del sistema.....	19
Figura 8. Disposición de planos y componentes para evitar inductancias y capacitancias parásitas en el circuito driver diseñado.....	21
Figura 9. Vista superior de diseño de PCB en 3D	22
Figura 10. Vista en perspectiva de la parte superior del diseño de PCB en 3D	23
Figura 11. Vista inferior del diseño de PCB en 3D	23
Figura 12. (a) Vista de la parte superior y (b) vista de la parte inferior de la PCB construida.	24
Figura 13. Circuito driver con todos sus elementos	24
Figura 14. (a) Vista de la parte superior y (b) vista de la parte inferior de la PCB construida por empresa externa.	25
Figura 15. Medida con sonda terminada en punta y terminal de tierra en espiral.	26
Figura 16. Evaluación del del circuito driver antes de conectar el transistor SiC.	27
Figura 17. Curva de tensión al ingreso del sistema (sin transistor SiC) para diferentes valores de frecuencia.	28
Figura 18. Curva de consumo de corriente del sistema (sin transistor SiC) para diferentes valores de frecuencia.	28
Figura 19. Consumo de potencia del sistema (sin SiC) para diferentes frecuencias.....	29

Figura 20. Vista ampliada de una señal modulada con pulsos iniciales.....	30
Figura 21. En amarillo entrada al driver y en verde salida del driver hacia el transistor	30
Figura 22. 20 pulsos a 25 Mhz, ciclo de trabajo 50% en señal de 23 KHz, ciclo de trabajo 30%	31
Figura 23. 20 pulsos a 25 Mhz, ciclo de trabajo 50% y señal de 100 KHz, ciclo de trabajo 30%	32
Figura 24. 15 pulsos a 25 MHz / ciclo de trabajo 60%, seguido por 15 pulsos a 25 MHz / ciclo de trabajo de 50%; y señal de conmutación de 23 KHz / ciclo de trabajo 30%.	32
Figura 25. 30 pulsos a 25 MHz, ciclo de trabajo intercalados a 50% y 60% (promedio de 55%); señal de conmutación de 23 KHz, ciclo de trabajo 30%. 33	
Figura 26. Disposición de sondas de medida sobre el circuito driver.	35
Figura 27. Respuesta carga resistiva con señal de control no modulada. Señal de entrada en amarillo, V_{DS} en verde y corriente de la carga en color azul.	35
Figura 28. Plot de Matlab de la Respuesta del sistema a una carga resistiva con señal de entrada no modulada	36
Figura 29. Tiempo de subida de la tensión V_{DS} y tiempo de bajada de la corriente para carga resistiva con señal de control no modulada.	37
Figura 30. Tiempo de bajada de la tensión V_{DS} y tiempo de subida de la corriente para carga resistiva con señal de control no modulada.	37
Figura 31. Carga resistiva con señal modulada de 30 pulsos a 25 MHz - ciclo de trabajo 55% y señal principal de 23 KHz - ciclo de trabajo 30%. Señal de entrada en amarillo, tensión V_{DS} en verde y corriente de la carga en color azul.	38
Figura 32. Plot (realizado en MatLab) de la respuesta del sistema para la carga resistiva de 75 OHM y señal de entrada modulada.	39
Figura 33. Tiempo de subida de la tensión V_{DS} y tiempo de bajada de la corriente para carga resistiva con señal de control modulada.	40
Figura 34. Tiempo de bajada de la tensión de la carga y tiempo de subida de la corriente para carga resistiva con señal de control no modulada.	40
Figura 35. Bobina de inducción sobre la cual se colocarán los recipientes para evaluar el funcionamiento del sistema.	41
Figura 36. Cafetera de material ferromagnético utilizada para probar el sistema.	42
Figura 37. Respuesta carga de material ferromagnético, con señal de control no modulada. Señal de entrada en amarillo, tensión de la carga en verde, corriente de drenador en azul y corriente de la carga en color rojo. Tensión de bus de 75 V.	43
Figura 38. Vista ampliada de respuesta con carga de material ferromagnético, con señal de control no modulada; tensión V_{DS} en verde y corriente de drenador en azul. Tensión de bus de 75 V.	43
Figura 39. Respuesta carga de material ferromagnético, con señal de control no modulada. Señal de entrada en amarillo, tensión V_{DS} en verde, corriente de	

drenador en azul y corriente de la carga en color rojo. Tensión de bus de 170 V.	44
Figura 40. Vista ampliada de respuesta con carga de material ferromagnético, con señal de control no modulada; tensión V_{DS} en verde y corriente de drenador en azul. Tensión de bus de 170 V.	45
Figura 41. Respuesta carga de material ferromagnético, con señal de control modulada; 30 pulsos a 25 MHz ciclo de trabajo 55% y 23 KHz ciclo de trabajo 30%. Señal de entrada en amarillo, tensión V_{DS} en verde, corriente de drenador en azul y corriente de la carga en color rojo. Tensión de bus de 75 V.	46
Figura 42. Vista ampliada de respuesta con carga de material ferromagnético, con señal de control modulada; 30 pulsos a 25 MHz ciclo de trabajo 55% y 23 KHz ciclo de trabajo 30%. Tensión V_{DS} en verde, corriente de drenador en azul. Tensión de bus de 75 V.	46
Figura 43. Respuesta carga de material ferromagnético, con señal de control modulada; 30 pulsos a 25 MHz con ciclo de trabajo 55% y 23 KHz ciclo de trabajo 30%. Señal de entrada en amarillo, tensión V_{DS} en verde, corriente de drenador en azul y corriente de la carga en color rojo. Tensión de bus de 170 V.	47
Figura 44. Vista ampliada de respuesta con carga de material ferromagnético, con señal de control modulada; 30 pulsos a 25 MHz ciclo de trabajo 55% y 23 KHz ciclo de trabajo 30%. Tensión V_{DS} en verde, corriente de drenador en azul. Tensión de bus de 170 V.	48
Figura 45. Respuesta carga de material ferromagnético, con señal de control modulada; 35 pulsos a 25 MHz ciclo de trabajo 55% y 23 KHz ciclo de trabajo 30%. Señal de entrada en amarillo, tensión de la carga en verde, corriente de drenador en azul y corriente de la carga en color rojo. Tensión de bus de 170 V.	49
Figura 46. Respuesta carga de material ferromagnético, con señal de control modulada; 40 pulsos a 25 MHz ciclo de trabajo 55% y 23 KHz ciclo de trabajo 30%. Señal de entrada en amarillo, tensión de la carga en verde, corriente de drenador en azul y corriente de la carga en color rojo. Tensión de bus de 170 V.	50
Figura 47. Vista ampliada de respuesta con carga de material ferromagnético, con señal de control modulada; 40 pulsos a 25 MHz ciclo de trabajo 55% y 23 KHz ciclo de trabajo 30%. Tensión de la carga en verde, corriente de drenador en azul. Tensión de bus de 170 V.	50
Figura 48. Respuesta carga de material ferromagnético, con señal de control modulada; 45 pulsos a 25 MHz ciclo de trabajo 55% y 23 KHz ciclo de trabajo 30%. Señal de entrada en amarillo, tensión de la carga en verde, corriente de drenador en azul y corriente de la carga en color rojo. Tensión de bus de 170 V.	51
Figura 49. Cafetera de aluminio utilizada para probar el sistema.	52

Figura 50. Respuesta recipiente de aluminio, con señal de control no modulada; 100 KHz ciclo de trabajo 50%. Señal de entrada en amarillo, tensión V_{DS} en azul, corriente de drenador en verde y corriente de la carga en color rojo. Tensión de bus de 170 V.....	53
Figura 51. Respuesta recipiente de aluminio, con señal de control modulada; 20 pulsos a 25 MHz ciclo de trabajo 55% y 100 KHz ciclo de trabajo 50%. Señal de control en amarillo, tensión V_{DS} en azul, corriente de drenador en verde y corriente de la carga en color rojo. Tensión de bus de 170 V.....	54
Figura 52. Estimación de la potencia de entrada al sistema para una carga de material ferromagnético y con señal de control no modulada de 23 KHz ciclo de trabajo 30%.....	55
Figura 53. Estimación de la potencia entregada por el sistema hacia una carga con recipiente de material ferromagnético y con señal de control no modulada de 23 KHz ciclo de trabajo 30%.....	56
Figura 54. Estimación de la potencia de entrada al sistema para una carga de material ferromagnético y con señal de control modulada de 40 pulsos a 25 MHz, ciclo de trabajo de 55% y señal de conmutación de 23 KHz ciclo de trabajo 30%.....	57
Figura 55. Estimación de la potencia entregada por el sistema hacia una carga de material ferromagnético y con señal de control modulada de 40 pulsos a 25 MHz, ciclo de trabajo de 55% y señal de conmutación de 23 KHz ciclo de trabajo 30%.....	58
Figura 56. Estimación de la potencia de entrada al sistema para una carga de material ferromagnético y con señal de control modulada de 40 pulsos a 25 MHz, ciclo de trabajo de 55% y señal de conmutación de 25 KHz, ciclo de trabajo 40%.....	59
Figura 57. Estimación de la potencia entregada por el sistema hacia una carga de material ferromagnético y con señal de control modulada de 40 pulsos a 25 MHz, ciclo de trabajo de 55% y señal de conmutación de 25 KHz, ciclo de trabajo 40%.....	60
Figura 58. Estimación de la potencia de entrada al sistema para una carga de aluminio y con señal de control no modulada de 100 KHz, ciclo de trabajo 50%.....	61
Figura 59. Estimación de la potencia entregada por el sistema hacia una carga de aluminio y con señal de control no modulada de 100 KHz, ciclo de trabajo 50%.....	62
Figura 60. Estimación de la potencia de entrada al sistema para una carga de aluminio, con señal de control modulada de 20 pulsos a 25 MHz, ciclo de trabajo de 55% y señal de conmutación de 100 KHz, ciclo de trabajo 50%.	63
Figura 61. Estimación de la potencia entregada por el sistema hacia una carga de aluminio, con señal de control modulada de 20 pulsos a 25 MHz, ciclo de trabajo de 55% y señal de conmutación de 100 KHz, ciclo de trabajo 50%.	64
Figura 62. Distribución de temperatura en la superficie de contacto entre el recipiente ferromagnético y la bobina de inducción.....	65

Figura 63. Distribución de temperatura sobre los elementos del circuito driver, trabajando con señal de control no modulada y con recipiente ferromagnético.	66
Figura 64. Distribución de temperatura sobre los elementos del circuito driver, trabajando con señal de control modulada y con recipiente ferromagnético..	67
Figura 65. Distribución de temperatura en la superficie de contacto entre el recipiente de aluminio y la bobina de inducción.	68
Figura 66. Distribución de temperatura sobre los elementos del circuito driver, trabajando con señal de control no modulada y con recipiente de aluminio. ..	69
Figura 67. Distribución de temperatura sobre los elementos del circuito driver, trabajando con señal de control modulada y con recipiente de aluminio.	70

Lista de Tablas

Tabla 1. Nomenclatura y descripción de recipientes y materiales que los conforman.	14
Tabla 2. Principales características del MOSFET SiC CMF20120	19
Tabla 3. Principales características del Traco Power THN 15-1213.....	20
Tabla 4. Principales características del Traco Power TEN 4-2410.....	20
Tabla 5. Corriente, tensión y potencia consumida por el sistema (sin transistor SiC) al inyectar señal cuadrada con diferentes valores de frecuencia.....	27
Tabla 6. Tensión y corriente consumida por el sistema (sin SiC) para diferentes señales a la entrada del driver.	33

Listado de Términos y Acrónimos

FEM	Fuerza Electromotriz
MOSFET	Metal Oxide Semiconductor Field Effect Transistor (Transistor de Efecto de Campo de Metal-Óxido-Semiconductor)
PCB	Printed Circuit Board (Placa de Circuito Impreso)
SiC	Semiconductor de Carburo de Silicio
ZVS	Zero Voltage Switching (Conmutación en Voltaje Cero)
ZCS	Zero Current Switching (Conmutación

1 INTRODUCCIÓN

1.1 Justificación

Actualmente coexisten varias formas de calentar o cocinar los alimentos; pero se ha comprobado que el sistema más eficiente es el calentamiento por inducción. Este alcanza eficiencias de alrededor del 95%; mientras que las vitrocerámicas de niquelinas no sobrepasan el 65% y peor aún las cocinas a gas que se quedan alrededor del 55% de eficiencia (Vincent M., 2007).

Por las comparaciones en cuanto a eficiencia podríamos asegurar que el calentamiento por inducción es mejor que los métodos tradicionales, sin embargo, uno de los principales problemas que impiden el poder obtener la máxima eficiencia energética en las cocinas de inducción, está directamente relacionado con el material de los recipientes utilizados y la frecuencia máxima de trabajo.

La justificación de este proyecto se basa en la necesidad de diseñar y construir un circuito driver para cocina de inducción, capaz de conmutar un MOSFET SiC de banda ancha, a la vez que reduzca los picos de corriente en la conmutación y trabaje en los rangos de frecuencias necesarios para calentar recipientes tanto de materiales ferromagnéticos como de otros materiales metálicos.

1.2 Objetivos

1.2.1 Objetivo Principal

Desarrollar un circuito driver para la activación de semiconductor de potencia de banda ancha (SiC)

1.2.2 Objetivos específicos

Diseñar el circuito driver del sistema, tanto a nivel de esquema electrónico como de PCB.

Implementar del prototipo y evaluar del sistema mediante medidas experimentales.

Identificar las señales de control y los elementos necesarios en el prototipo desarrollado, para obtener el mejor rendimiento y la máxima eficiencia al calentar recipientes de material ferromagnético y de aluminio.

2 ESTADO DEL ARTE

2.1 Principios del Calentamiento por Inducción

El calentamiento por inducción se basa en las leyes tales como la ley de Faraday y la ley de Ampere en conjunción en cierta medida con el efecto Joule (Carpio F., 2018).

Como establece la ley de Ampere, de forma simplificada, “la circulación de la intensidad del campo magnético en un contorno cerrado es igual a la corriente que lo recorre en ese contorno” (Quiceno D. E. G., 2011). Entonces, conforme a este precepto, podemos inferir que si la corriente que aplicamos es una corriente alterna, como resultado también obtendremos un campo magnético variable.

Si tenemos un conductor en forma de bobina; y si a este conductor lo sometemos a un campo magnético variable, la ley de Faraday dicta que en este se generará una fuerza electromotriz (FEM), cuya amplitud dependerá de las espiras que se hallan formado y del flujo de campo magnético aplicado (Galili, I., Kaplan, D., & Lehavi, Y., 2006).

$$\epsilon = N \frac{d\varphi_m}{dt} \quad (1)$$

ϵ : Fuerza electromotriz (FEM)

φ_m : Flujo de campo magnético

N : Número de espiras

La FEM generada, provocará en el material conductor (el recipiente) corrientes parásitas denominadas corrientes de Foucault, las cuales a su vez generan un campo magnético que se opone al inicialmente aplicado (Plonus, M. A., 1994).

Las corrientes de Foucault inducidas, debido a las particularidades del efecto Joule, provocan el calentamiento del material; y si este es ferromagnético, el efecto de calentamiento se intensifica debido a las pérdidas por histéresis (DOE U., 1998).

Es así que, los procesos relacionados con las leyes mencionadas, transforman la energía del campo electromagnético en calor; aunque cabe destacar que, en las aplicaciones de calentamiento por inducción, tiene mayor interacción el efecto de corrientes inducidas que el de histéresis (Leon J., 2011).

A más de lo anteriormente expuesto, para que un sistema de calentamiento por inducción cumpla con su cometido, se debe diseñar de acuerdo al tipo de

material que se va a calentar. Y es que, no todos los materiales responden de la misma manera ante las variaciones de campo magnético. En la Figura 1 se muestra cómo varía la inductancia de distintos materiales conforme aumenta la frecuencia. Los materiales de los recipientes analizados en la Figura 1 y en la Figura 2, se describen en la Tabla 1 (Semiconductor, O., 2015).

Recipiente	Descripción
No pan	Sin recipiente
304 SS	Recipiente de acero inoxidable 304
430 SS	Recipiente de acero inoxidable 430
Cast iron	Recipiente de hierro fundido
Alum	Recipiente de aluminio
5 ply	Recipiente de 5 capas dispuestas en el siguiente orden: <ol style="list-style-type: none"> 1. Acero inoxidable 430 2. Aleación de aluminio 3. Aluminio puro 4. Aleación de aluminio 5. Acero inoxidable 304

Tabla 1. Nomenclatura y descripción de recipientes y materiales que los conforman.

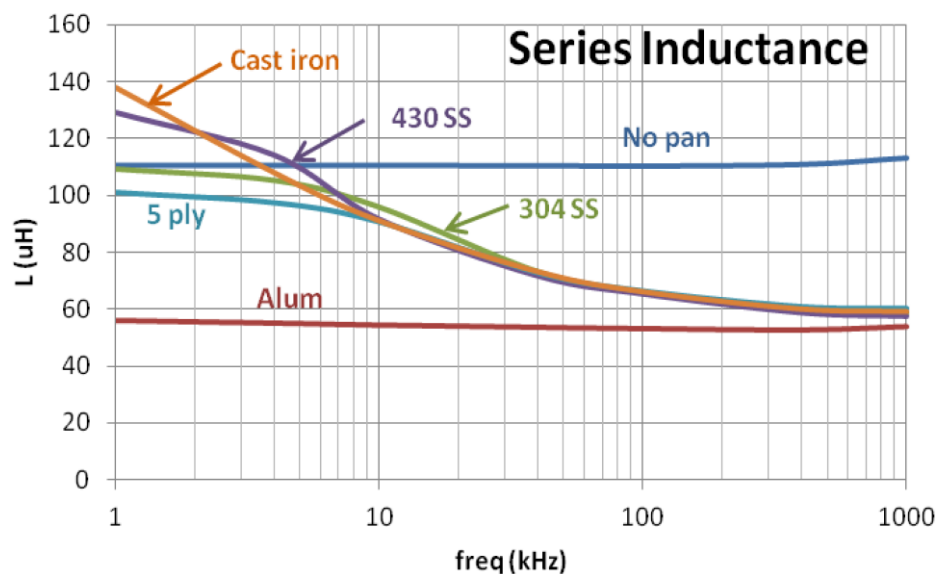


Figura 1. Inductancia serie equivalente de la carga (bobina y recipiente) en función de la frecuencia, para recipientes de distintos materiales. Recuperado de (Semiconductor, O., 2015)

De igual manera, conforme la frecuencia aumenta, la resistencia de los materiales también cambia, tal como se muestra en la Figura 2.

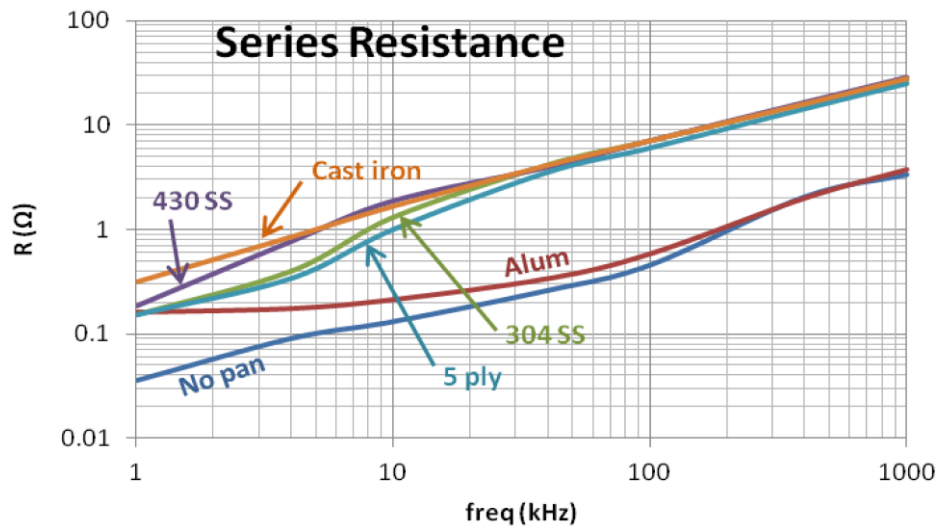


Figura 2. Resistencia serie equivalente de la carga (bobina y recipiente) en función de la frecuencia, para recipientes de distintos materiales. Recuperado de (Semiconductor, O., 2015)

2.2 Cocinas de Inducción

En las cocinas de inducción, el recipiente actúa como un núcleo para la bobina (de núcleo de aire) en la que se coloca. Normalmente un componente magnético se diseña para minimizar las pérdidas del núcleo, seleccionando un material adecuado para obtener la mayor eficiencia. En el calentamiento por inducción, sucede lo opuesto y en este caso el núcleo debe tener muchas pérdidas, para que el campo magnético generado por el convertidor de potencia se convierta en calor (Semiconductor O., 2015).

En la Figura 3 se muestra la estructura típica de una cocina de inducción. En ella vemos que la cocina toma la energía de la tensión de la red, la cual se rectifica mediante un puente completo de diodos. Adicionalmente tenemos un filtro de bus diseñado para permitir que una gran ondulación de voltaje obtenga un factor de potencia de entrada resultante cercano a uno. Luego, la topología del inversor suministra la corriente de alta frecuencia a la bobina de inducción (Llorente, S. et al., 2002). Esta corriente produce un campo magnético alterno, que causa corrientes de Foucault en la capa inferior del recipiente, las cuales, combinadas con la histéresis magnética del material, generan el calor sobre dicho recipiente (Millan, I., et al., 2007).

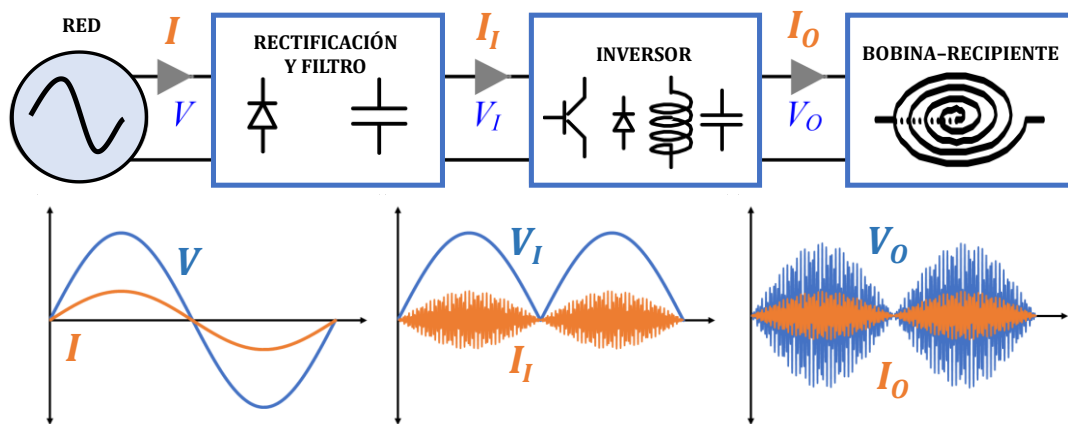


Figura 3. Estructura de una cocina de inducción (etapa de potencia)

Los sistemas de cocinas por inducción combinan una etapa de potencia junto con un sistema de control y que además controla los problemas de gestión térmica (Semiconductor O., 2014, octubre).

A continuación, se presenta en la Figura 4 el diagrama de bloques completo de una cocina de inducción. En este caso se observa que, a diferencia de la figura anterior, ahora se incluyen los bloques de la fuente de alimentación, el sistema de control propiamente dicho, que además gestiona el sistema de refrigeración y la etapa de potencia, que sería el bloque que engloba los elementos descritos en la estructura anterior.

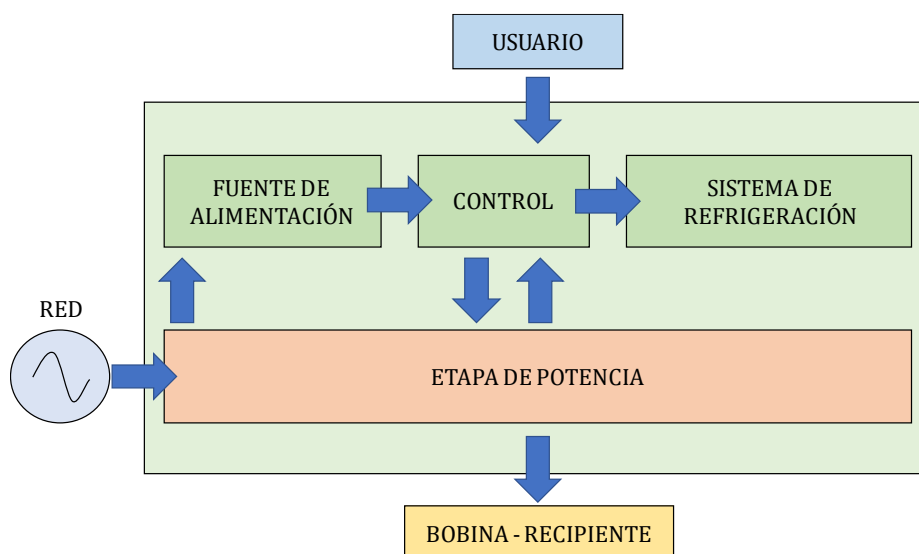


Figura 4. Diagrama de bloques completo de una cocina de inducción.

2.2.1 Ventajas y Desventajas de las Cocinas de Inducción Actuales

Ventajas

Mayor eficiencia. Presentan mayor eficiencia energética en comparación con los sistemas de cocción tradicionales.

Rapidez de calentamiento. Ya que el calentamiento por inducción actúa directamente sobre el recipiente, este se calienta más rápido; a diferencia de los sistemas tradicionales donde se presentan retardos y pérdidas ya que se requiere la transmisión del calor desde una fuente hacia el recipiente.

Mayor seguridad para el usuario. Ya que el calentamiento se da directamente sobre el recipiente no hay riesgo de quemaduras en la zona de cocción, la cual presenta una temperatura inferior (Lucía, O., Maussion, P., Dede, E. J., & Burdío, J. M., 2013).

Desventajas

Elevado coste inicial. Dado que para obtener el comportamiento deseado se requieren elementos electrónicos de potencia capaces de manejar con rapidez las variaciones en consumo de corriente y tensión. Y que además deben contar con un sistema de refrigeración que permita mantener la temperatura óptima para el correcto funcionamiento de los componentes del sistema.

Funcionan con material ferromagnético. Actualmente la mayoría de cocinas de inducción comerciales funcionan únicamente con recipientes de material ferromagnético, por lo que no se pueden utilizar otros materiales como aluminio o cobre (Amrhein, A., & Lai, J. S. J., 2015, June).

2.3 Inversores Cuasi-resonantes

Las topologías para este tipo de convertidores presentan la ventaja de utilizar un único transistor de potencia cuya referencia de disparo se encuentra referida a la tierra del sistema. Sin embargo, en contraparte, presentan como desventaja la generación de grandes picos de corriente y tensión, así como también el hecho de ser muy vulnerables a las EMI (Dankov, D. D., & Prodanov, P. I., 2017).

2.4 Topología de inversor Single Switch ZVS

Esta topología es la que se utilizará en el circuito driver desarrollado en este trabajo. En la Figura 5 se muestra el circuito o diagrama equivalente del inversor Single Switch. Este inversor se alimenta de una fuente de voltaje de corriente continua U_d . La resistencia R_0 y la inductancia L_0 representan el sistema de carga del inductor. El interruptor electrónico de potencia S puede conducir la corriente en ambas direcciones.

Se pretende que el inversor funcione de una manera que asegure la conmutación del transistor a voltaje cero (ZVS).

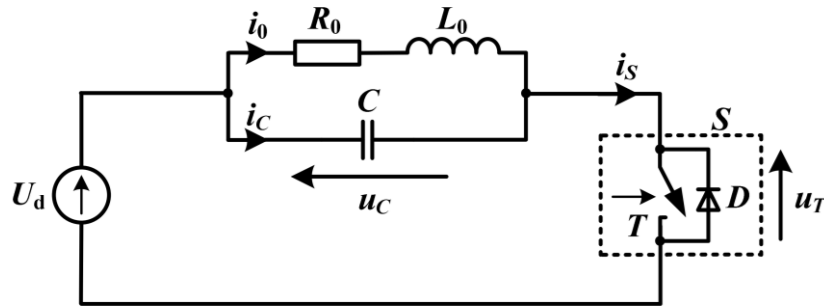


Figura 5. Diagrama del Circuito del inversor single-switch. Recuperado de (Skala, A., & Waradzyn, Z., 2016).

En cada ciclo de conmutación, el inversor funciona en dos modos y sus circuitos equivalentes para cada modo se muestran en la Figura 6:

- En el modo I, el interruptor S conduce la corriente eléctrica. El voltaje u_C en C y R_0L_0 es prácticamente constante e igual a U_d y la corriente de carga i_0 , igual al interruptor de corriente i_S , aumenta exponencialmente.
- En el modo II, el interruptor S está apagado. Se produce una oscilación en el circuito R_0L_0C , que dura hasta que u_C alcanza la tensión de alimentación U_d .

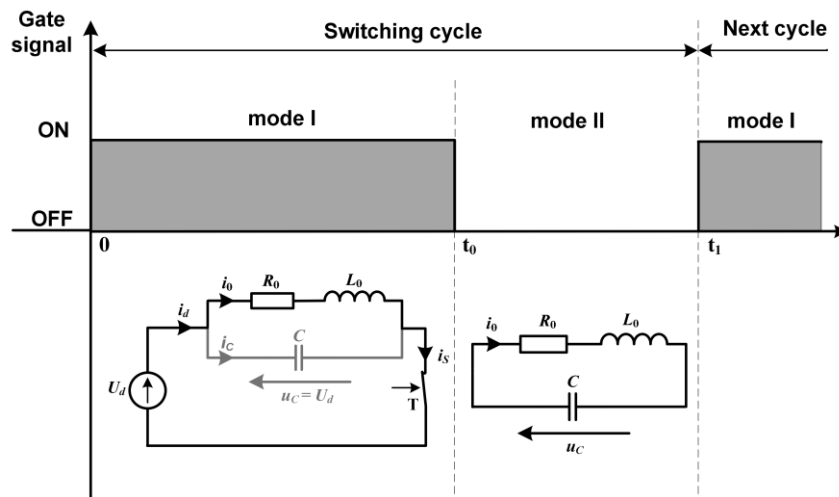


Figura 6. Circuitos equivalentes del inversor en Modo I y Modo II. Recuperado de (Skala, A., & Waradzyn, Z., 2016).

3 DISEÑO DEL SISTEMA

3.1 Simulaciones del comportamiento de la topología seleccionada

En la Figura 7 se ha simulado la conmutación del MOSFET SiC. Para ello se ha generado una señal de control modulada con 40 pulsos iniciales de frecuencia 25 MHz, ciclo de trabajo de 55%, sobre una señal principal de conmutación de 25 KHZ al 40% de ciclo de trabajo. Se han ajustado los parámetros de la simulación para que respondan acorde al driver utilizado, adicionalmente se ha incluido el modelo del MOSFET CMF20120. En la parte superior tenemos la señal de control que ingresa al driver y en rojo la señal de salida que conmutará al transistor. En la parte inferior de la figura se observa en verde la tensión VDS que es la tensión Drenador-Surtidor con una amplitud alrededor de los 475 V y en rojo tenemos la corriente de Drenador cuyo pico máximo llega hasta los 35 A. Observamos que el pico de corriente es más de tres veces superior a la corriente nominal de consumo de la carga establecida; ello se debe a que el transistor está conmutando cuando tenemos un nivel de tensión Drenador-Surtidor muy alto.

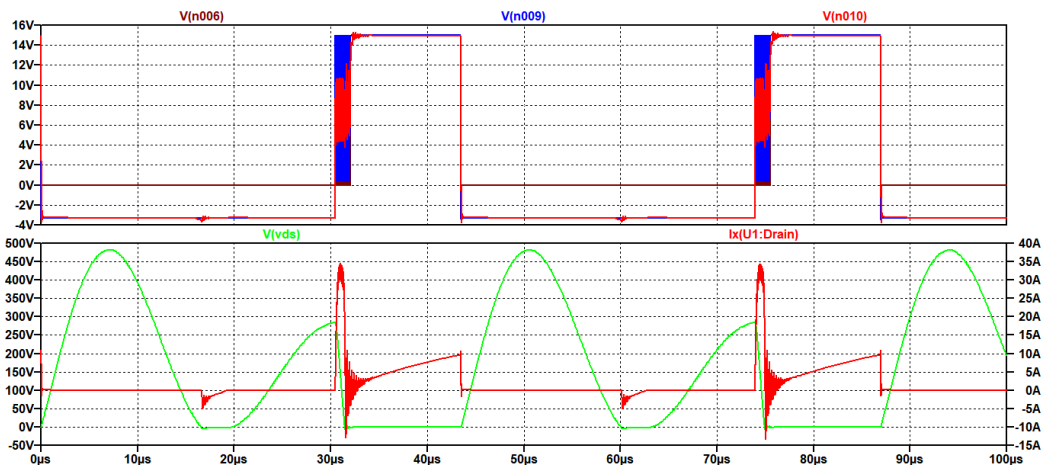


Figura 7. Simulación de la respuesta esperada del sistema.

3.2 Principales Componentes del Circuito Driver Desarrollado.

3.2.1 MOSFET SiC CMF20120

El CMF20120 es un MOSFET de potencia de Carburo de Silicio. Permite una conmutación de alta velocidad con bajas capacidades y un alto voltaje de bloqueo con bajo RDS (on). Sus principales características se presentan en la

Atributo	Valor
V _{DS}	1200 V
I _{D(MAX)}	42 A
R _{DS(on)}	80 mΩ

Tabla 2. Principales características del MOSFET SiC CMF20120

3.2.2 Driver SI8271AB-IS

El driver Si8271AB-IS, con su inmunidad al ruido de alto rendimiento, elimina el riesgo que suponen las altas velocidades de conmutación. Los transitorios de alto ruido generados por la alta velocidad conmutación no afectarán la integridad de la señal a través del controlador, eliminando así el riesgo de pérdida de modulación. Este driver opera con un amplio rango de 2.5 V - 5.5 V de entrada VDD y una tensión máxima de alimentación del variador de 5 V. La tecnología de aislamiento ofrece bajas emisiones de EMI, larga vida útil, especificaciones de tiempo rápidas y precisas y un amplio rango de temperatura de -40 ° C a + 125 ° C.

3.2.3 Traco Power THN 15-1213

El Traco Power THN 15-1213 es un convertidor DC-DC de alto rendimiento y alta densidad de potencia. Viene en un paquete de metal blindado y encapsulado con dimensiones de solo 1.0 "x1.0" x 0.4 ". Proporciona una alta eficiencia de hasta el 88%, lo que permite un rango de temperatura de funcionamiento de -40 ° C a + 85 ° C (con reducción de potencia). Otras características incluyen encendido/apagado remoto y salida ajustable. Las principales características de este elemento se detallan en la Tabla 3.

Atributo	Valor
Rango de voltaje de ingreso	9-18 VDC (12 VDC nominal)
Tensión de salida	15 VDC
Corriente de salida máxima	1000 mA
Eficiencia típica	88%

Tabla 3. Principales características del Traco Power THN 15-1213.

3.2.4 Traco Power TEN 4-2410

El TEN 4-2410 es un convertidor DC-DC diseñado para aplicaciones que requieren un rango de voltaje de operación muy amplio. Las aplicaciones típicas son sistemas de comunicación de datos y telefonía, equipos móviles con batería y sistemas de control de procesos industriales que funcionan con diferentes voltajes de entrada. La alta eficiencia permite el funcionamiento hasta + 75 ° C a plena carga. Además, posee filtrado de entrada de acuerdo con la norma EN 55022-A y FCC, nivel A. En la Tabla 4 se presentan las principales características del Traco Power TEN 4-2410.

Atributo	Valor
Rango de voltaje de ingreso	9-36 VDC (24 VDC nominal)
Tensión de salida	3,3 VDC
Corriente de salida máxima	900 mA
Eficiencia típica	77%

Tabla 4. Principales características del Traco Power TEN 4-2410

3.3 Diseño de la PCB

Para diseñar la PCB de nuestro circuito driver se ha utilizado el software KiCad, el cual es un paquete de software libre para la automatización del diseño electrónico. Partimos por elaborar el esquemático y posterior a ello se procedió a montar los elementos en las posiciones adecuadas dentro del programa de diseño de PCB. Dicho diseño se ha realizado a doble capa.

Se ha prestado especial atención a la disposición de los elementos y las pistas para evitar inductancias y capacitancias parásitas, en especial cerca del driver y el transistor, ya que la existencia de las mismas puede afectar al correcto funcionamiento de los elementos mencionados y del sistema en general. Se han evitado líneas paralelas y se han las conexiones y pads de los elementos de forma perpendicular entre sí. Adicionalmente se ha hecho uso de planos de masa y planos de alimentación en lugar de crear únicamente pistas, reduciendo así las inductancias parásitas. En la Figura 8, podemos ver la disposición del driver y el transistor SiC en una porción de la PCB diseñada (vista 3D generada en KiCad). Podemos ver claramente que, los pines, las pistas conectadas y elementos conectados del driver y el transistor SiC, se encuentran de forma perpendicular entre sí; además se constata la utilización de planos de tierra en el diseño.

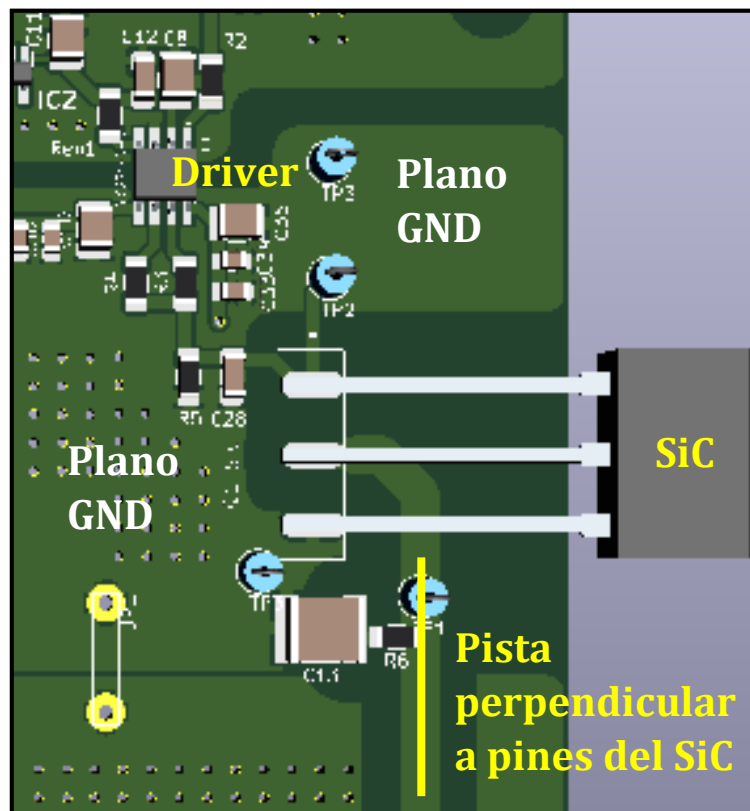


Figura 8. Disposición de planos y componentes para evitar inductancias y capacitancias parásitas en el circuito driver diseñado.

Al finalizar el diseño se generó las visualizaciones 3D que nos dan una idea muy cercana de cómo quedará físicamente nuestra PCB. La Figura 9 muestra la vista 3D de la parte superior de la PCB, la misma se obtuvo directamente desde el software KiCad.

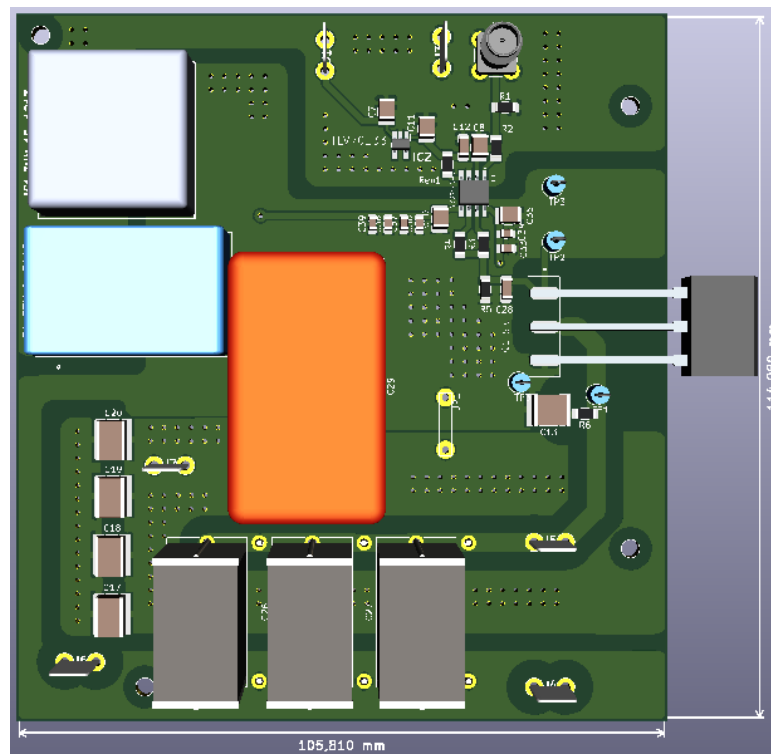


Figura 9. Vista superior de diseño de PCB en 3D

En la Figura 10 se presenta una vista en perspectiva del circuito driver diseñado, en esta imagen se pueden apreciar la mayoría de los componentes de la parte superior y una mínima parte de los componentes de la parte inferior

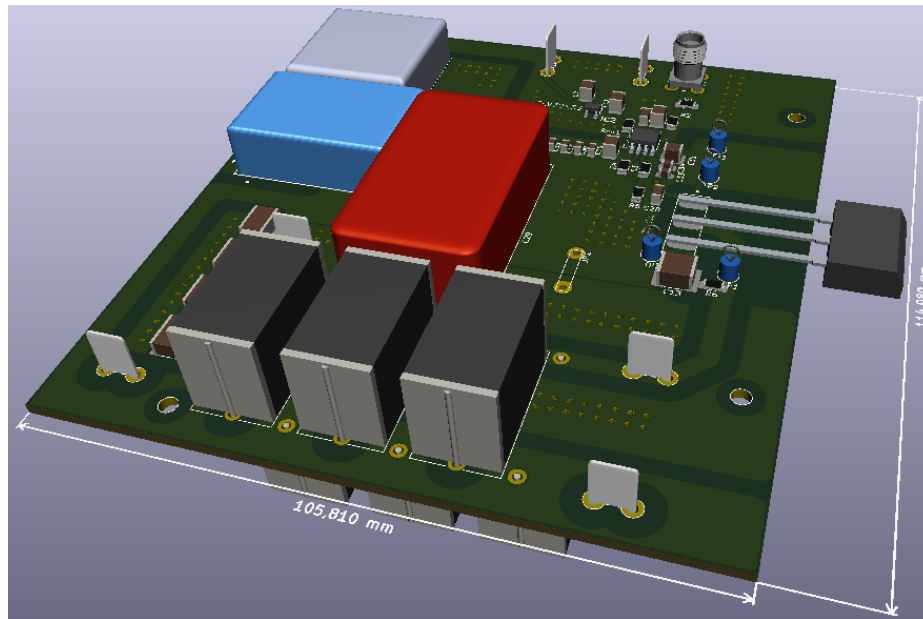


Figura 10. Vista en perspectiva de la parte superior del diseño de PCB en 3D

Para terminar con las representaciones 3D, tenemos la vista de la parte inferior en la Figura 11.

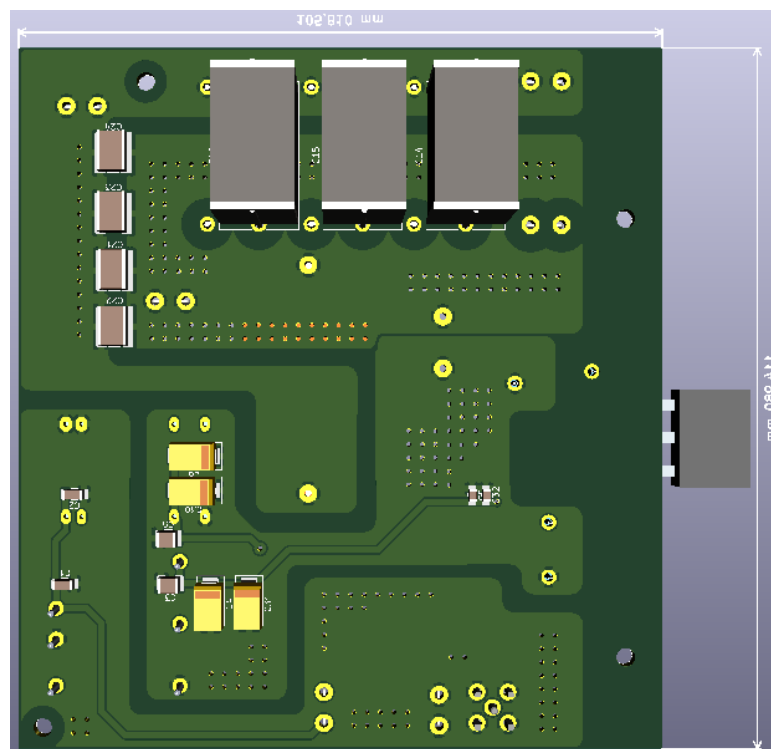


Figura 11. Vista inferior del diseño de PCB en 3D

Una vez culminado el diseño se procedió a la construcción de la PCB, en los laboratorios de la UPC destinados a este fin. La Figura 12 muestra la parte superior e inferior de la versión real de la PCB construida.

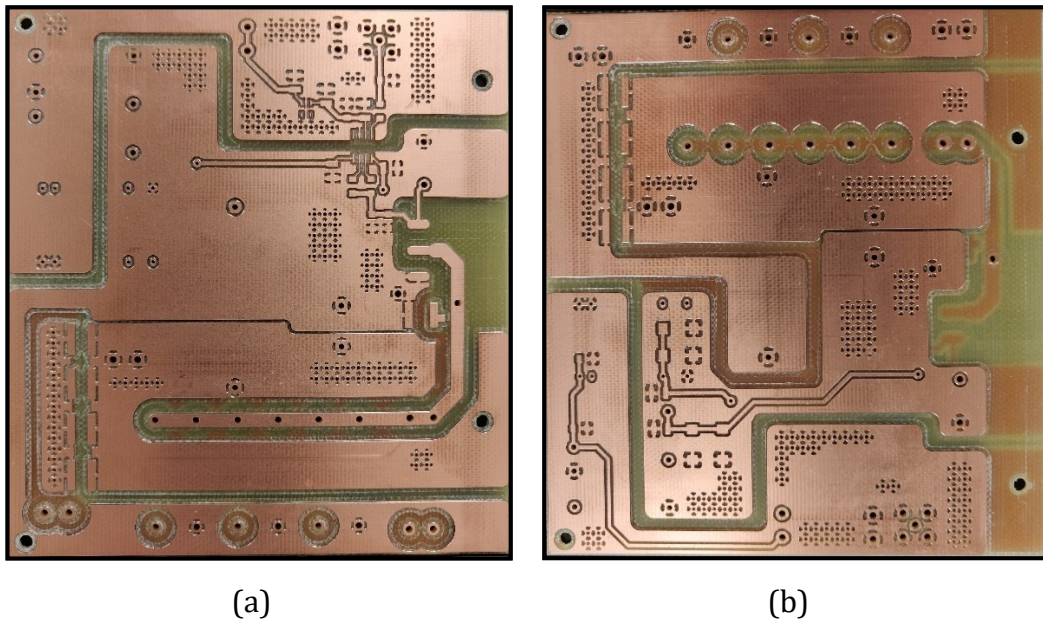


Figura 12. (a) Vista de la parte superior y (b) vista de la parte inferior de la PCB construida.

Por último, en la Figura 13 se muestra del circuito driver diseñado, en este se han agregado y soldado cada uno de los componentes electrónicos, consiguiendo así el prototipo final listo para realizar las pruebas pertinentes. Además, se señalan los principales componentes del circuito en dicha figura.

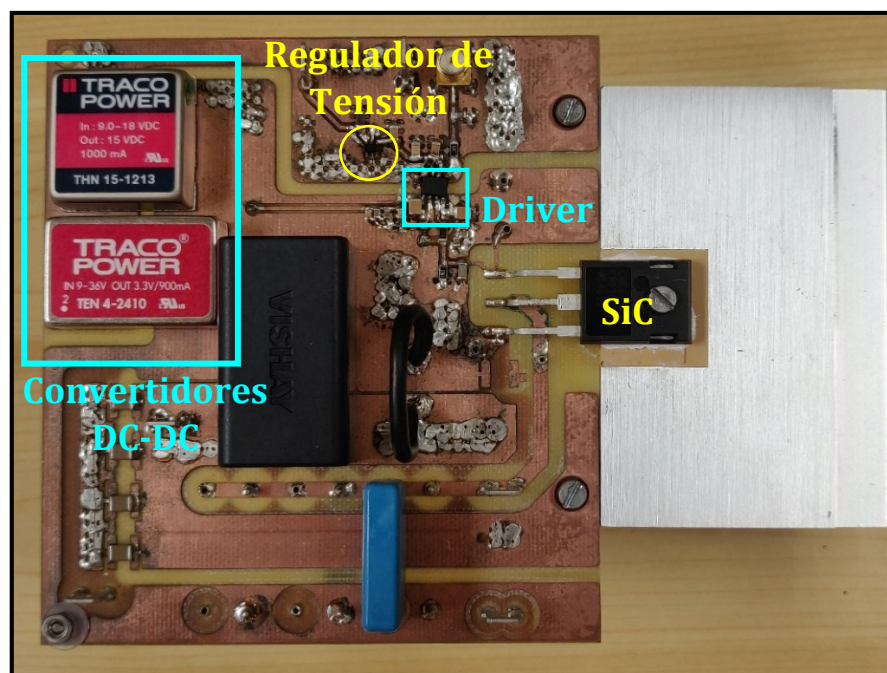


Figura 13. Circuito driver con todos sus elementos

Figura 14. (a) Vista de la parte superior y (b) vista de la parte inferior de la PCB construida por empresa externa.

4 RESULTADOS EXPERIMENTALES

Antes de empezar a realizar las medidas correspondientes, se han tomado en cuenta ciertos requerimientos para obtener resultados más precisos sobre las variables a medir.

Cuando se quiere hacer medidas con osciloscopio de una onda alterna, las sondas típicas que contienen un cable separado de tierra podrían afectar a las medidas debido a las inductancias parásitas que aparecen conforme aumenta la frecuencia de la señal. Este efecto negativo se puede evitar utilizando una sonda terminada en punta y con el cable de tierra muy corto y cercano al terminal positivo (Semiconductor O., 2014, noviembre).

En la Figura 15 se tiene la sonda utilizada para medir la señal Drenador-Surtidor de nuestro circuito y se muestra como se ha conectado. Este elemento es una sonda terminada en punta y con terminal de tierra en espiral.



Figura 15. Medida con sonda terminada en punta y terminal de tierra en espiral.

4.1 Evaluación del circuito driver sin transistor SiC

4.1.1 Consumo del circuito driver para diferentes frecuencias de señal de control

El montaje del sistema se hizo paulatinamente, conforme se incorporaban elementos a cada etapa, se ha comprobado que el sistema responda conforme a lo esperado, es así que luego de soldar el driver se hicieron las pruebas respectivas. En la Figura 16 se muestra el circuito driver antes de conectar el transistor SiC. Dada la inexistencia del transistor, a la salida del driver solo tendríamos como carga la resistencia de $3,3\text{ K}\Omega$ en paralelo con el condensador de $1,8\text{ nF}$. En este caso se ha probado el driver con una señal cuadrada no modulada de diferentes valores de frecuencia, los cuales van de 20 KHz hasta 1 MHz .

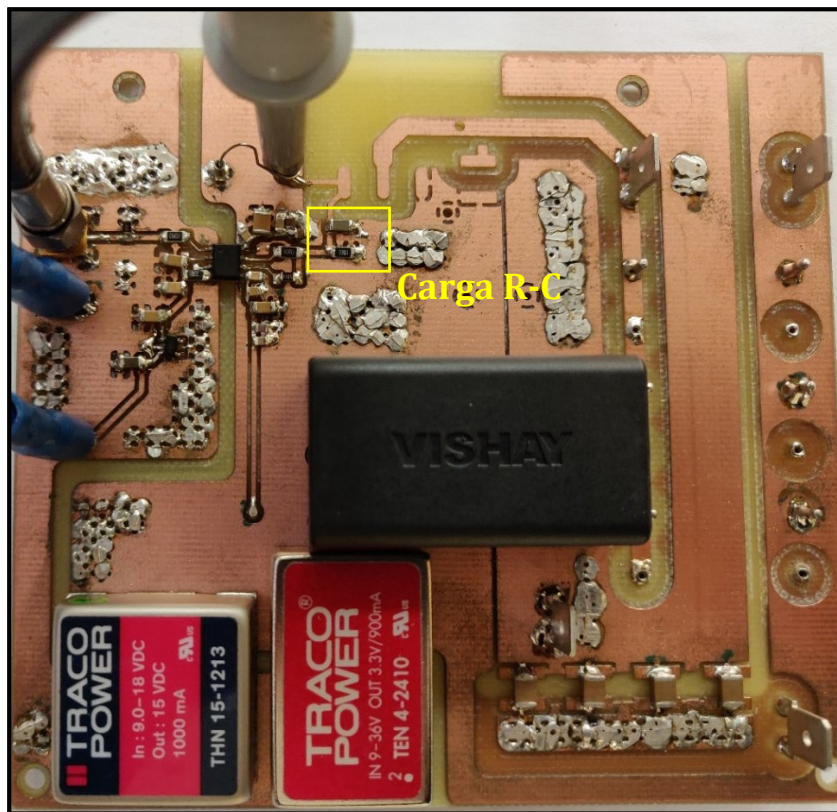


Figura 16. Evaluación del del circuito driver antes de conectar el transistor SiC.

En la Tabla 5 se muestra la respuesta del sistema (sin SiC) para varias frecuencias. Se observan los cambios en los valores de tensión y corriente consumida conforme aumenta la frecuencia; en la última columna se presenta la potencia conforme a los valores medidos de corriente y tensión.

Frecuencia	Corriente(mA)	Tensión (V)	Potencia (W)
20 KHz	51,3	12,09	0,620217
40 KHz	54,8	12,09	0,662532
60 KHz	58,1	12,09	0,702429
80 KHz	61,3	12,09	0,741117
100 KHz	64,3	12,09	0,777387
200 KHz	78,8	12,09	0,952692
300 KHz	94,9	12,09	1,147341
400 KHz	111,2	12,09	1,344408
500 KHz	126,4	12,09	1,528176
600 KHz	140,2	12,09	1,695018
700 KHz	153,5	12,09	1,855815
800 KHz	166,2	12,09	2,009358
900 KHz	178,7	12,08	2,158696
1 MHz	190,5	12,08	2,301240

Tabla 5. Corriente, tensión y potencia consumida por el sistema (sin transistor SiC) al inyectar señal cuadrada con diferentes valores de frecuencia.

En las siguientes figuras tenemos las curvas correspondientes a los consumos de tensión y corriente del circuito driver (sin SiC). Dichas curvas se presentan en la Figura 17 y la Figura 18 respectivamente. Adicionalmente, en la Figura 19 se presenta la curva de consumo de potencia según los valores obtenidos de tensión y corriente.

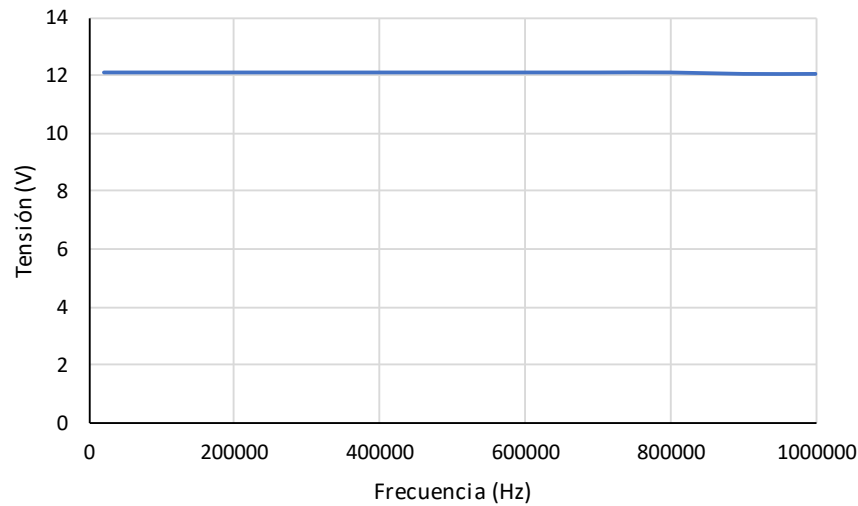


Figura 17. Curva de tensión al ingreso del sistema (sin transistor SiC) para diferentes valores de frecuencia.

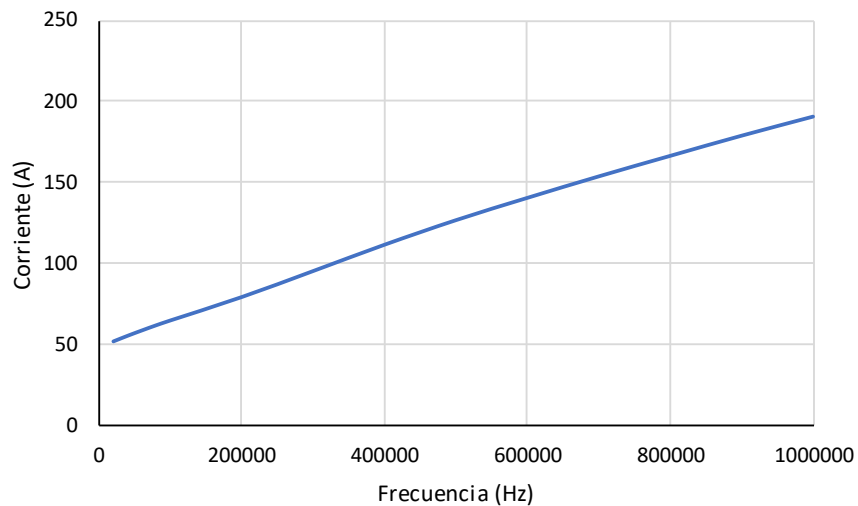


Figura 18. Curva de consumo de corriente del sistema (sin transistor SiC) para diferentes valores de frecuencia.

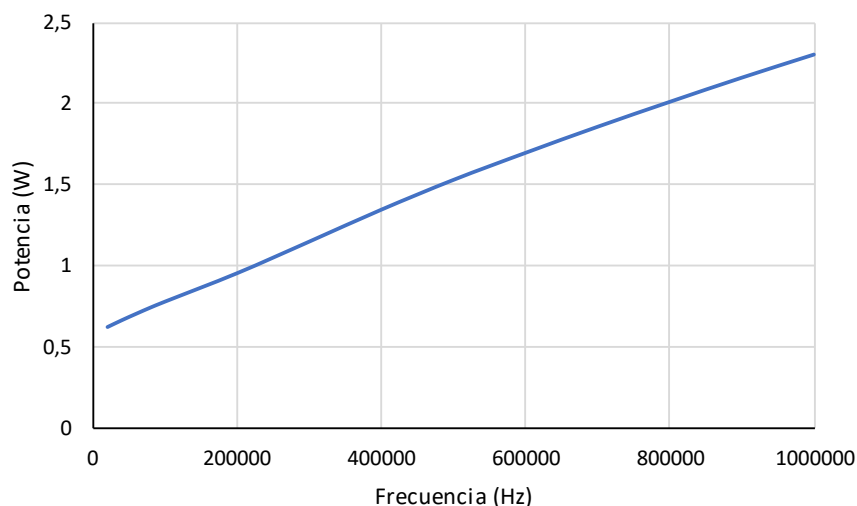


Figura 19. Consumo de potencia del sistema (sin SiC) para diferentes frecuencias.

4.1.2 Búsqueda de la mejor respuesta en el driver

Pulsos deseados en la entrada

Al aplicar los pulsos iniciales en la señal de entrada del driver, se debe verificar que estos pulsos mantengan una forma cuadrada con mínima degradación y con tiempos de subida y bajada mínimos. En la Figura 20 se puede apreciar la vista ampliada de una señal de entrada modulada con pulsos iniciales, se observa que, aunque no se tratan de pulsos cuadrados perfectos, aún así cumplirían con los parámetros deseados.

Respuesta deseada

Para evitar que la señal presente cambios abruptos en la salida del driver, se incorporan pulsos de mayor frecuencia que suavizan la subida de la señal que conmutará al transistor SiC, reduciendo de esta manera picos de corriente indeseados. En la Figura 21 podemos ver que, cuando se añaden pulsos iniciales en la señal de entrada, se consigue a la salida que el valor en alto pase por un nivel de amplitud intermedio, el mismo que depende del número de pulsos que se han introducido, de la frecuencia de dichos pulsos y de su valor de ciclo de trabajo.

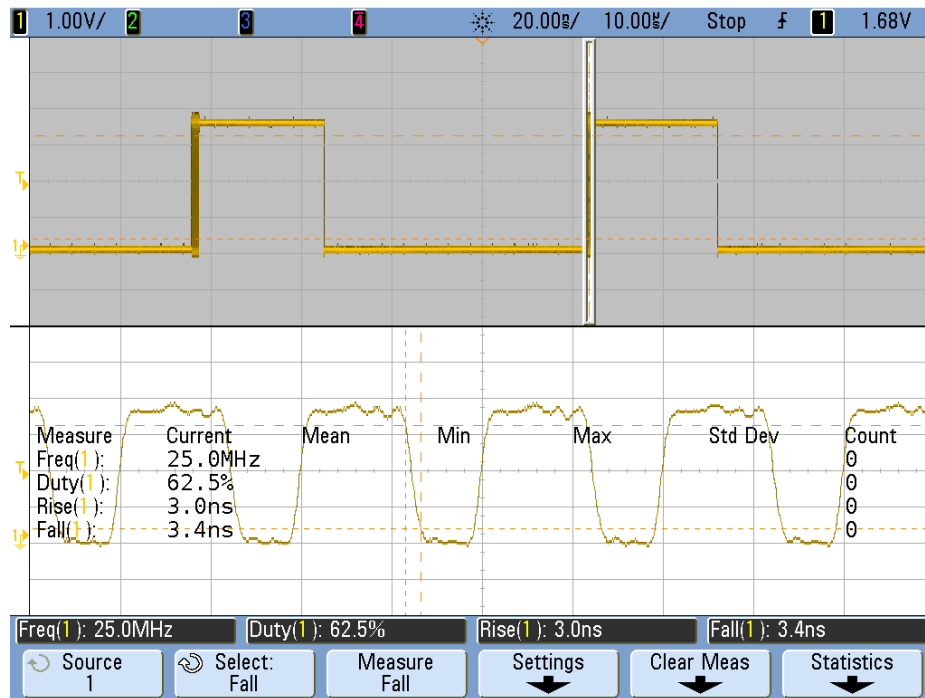


Figura 20. Vista ampliada de una señal modulada con pulsos iniciales.

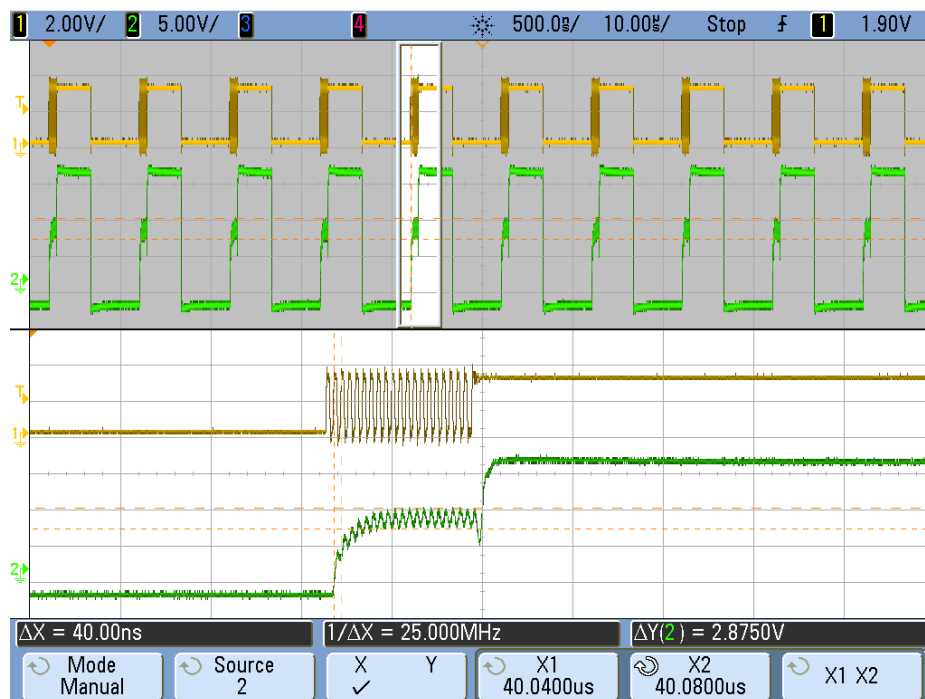


Figura 21. En amarillo entrada al driver y en verde salida del driver hacia el transistor

Mejor respuesta del driver

Los pulsos iniciales en todos los casos se generan a 25 MHz y lo único que cambiará será el número de pulsos y su ciclo de trabajo. La señal de

conmutación propiamente dicha, será una señal cuadrada con valores de frecuencia del orden de los KHz (23 y 25 KHz) y también de acuerdo a nuestros requerimientos de respuesta podremos variar su valor de ciclo de trabajo. La amplitud máxima a la salida según el diseño planteado es 18,3 V.

En la Figura 22 tenemos la respuesta a la salida del driver, es decir la señal sobre la carga R-C descrita anteriormente, cuando al ingreso hemos introducido una señal modulada que en su parte inicial tiene 20 pulsos a 25 Mhz, con ciclo de trabajo 50% y la señal de conmutación es de 23 KHz con ciclo de trabajo del 30%. En este caso observamos que la inserción de estos pulsos iniciales, hacen que el cambio de nivel a la salida del driver (en la carga R-C) sea más suavizado.

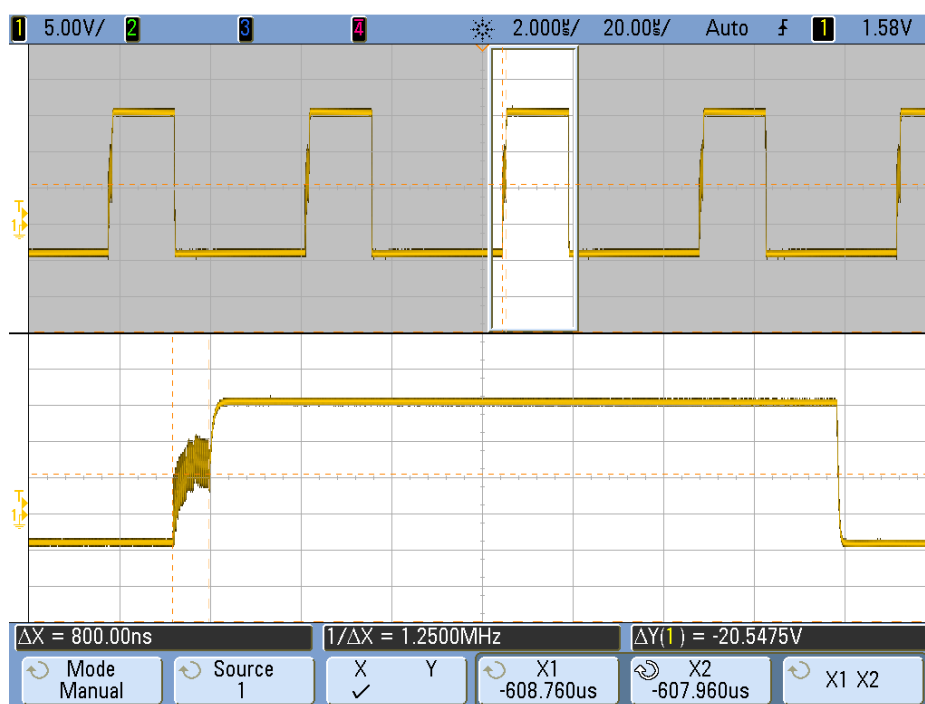


Figura 22. 20 pulsos a 25 Mhz, ciclo de trabajo 50% en señal de 23 KHz, ciclo de trabajo 30%

En la Figura 23 tenemos la respuesta a la salida del driver para una señal modulada que en su parte inicial tiene 20 pulsos a 25 Mhz, ciclo de trabajo 50% y la señal de conmutación es de 100 KHz, ciclo de trabajo 30%.

Luego, se muestra en la Figura 24 la respuesta del driver cuando en su ingreso tenemos una señal modulada conformada por 15 pulsos iniciales a 25 MHz, ciclo de trabajo 60%, seguido por 15 pulsos a 25 MHz, ciclo de trabajo de 50%; y una señal de conmutación de 23 KHz con ciclo de trabajo 30%.

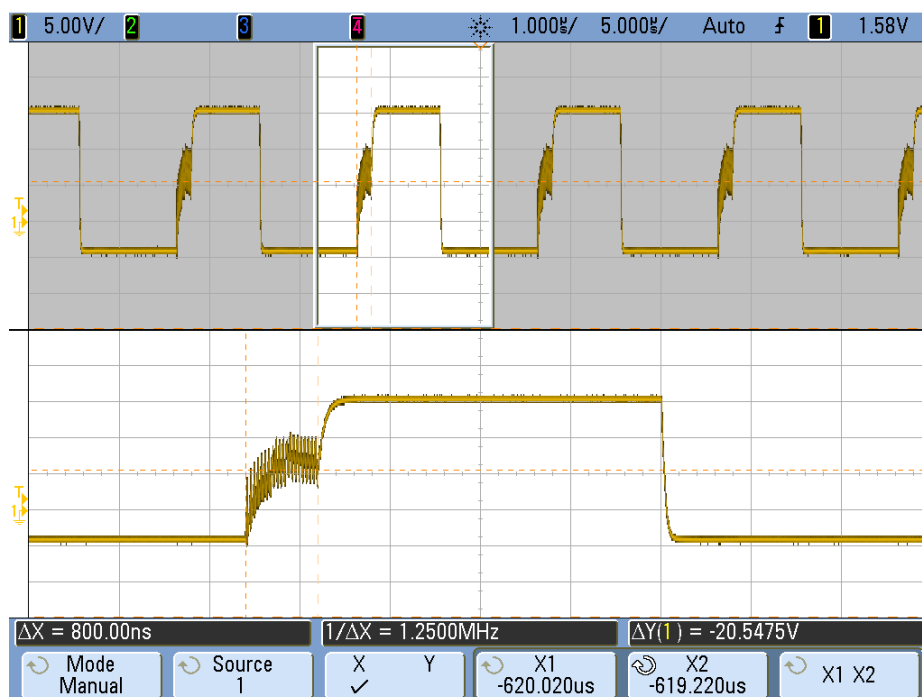


Figura 23. 20 pulsos a 25 Mhz, ciclo de trabajo 50% y señal de 100 KHz, ciclo de trabajo 30%

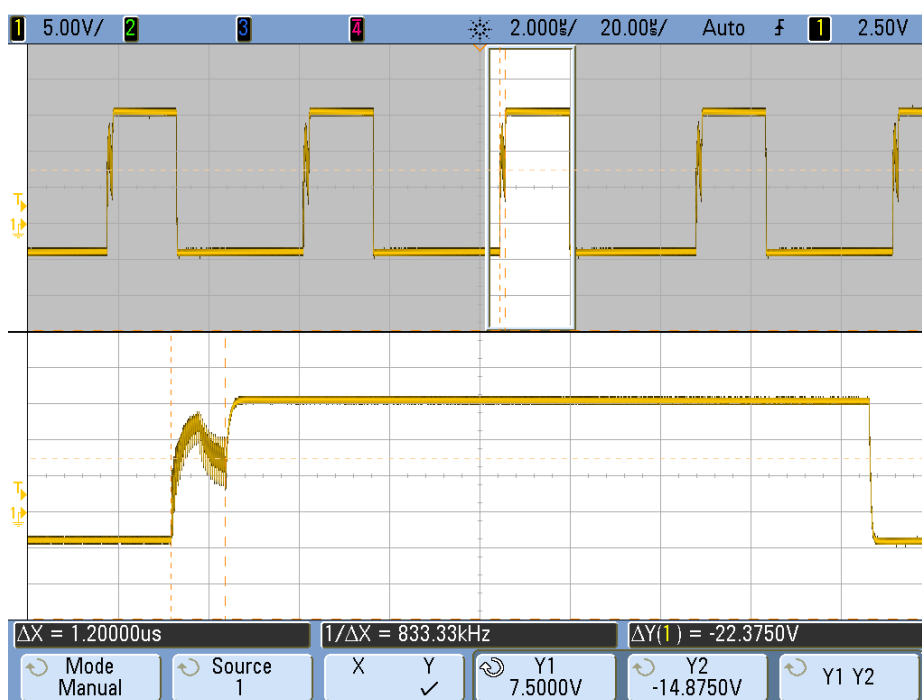


Figura 24. 15 pulsos a 25 MHz / ciclo de trabajo 60%, seguido por 15 pulsos a 25 MHz / ciclo de trabajo de 50%; y señal de conmutación de 23 KHz / ciclo de trabajo 30%.

Continuando con las variantes de señales, en la Figura 25 se muestra la respuesta a la salida del driver cuando en su ingreso hemos inyectado una señal modulada que en su parte inicial se ha conformado por 30 pulsos a 25 MHz con ciclos de trabajo intercalados de 50% y 60% (con lo que se consigue un ciclo de trabajo promedio de 55%); y la señal de conmutación es de 23 KHz con ciclo de trabajo 30%. En este caso obtenemos una respuesta que mejor se adapta a los requerimientos deseados, ya que el cambio de nivel se consigue de forma más suave y uniforme, en comparación con las señales de ingreso anteriores.

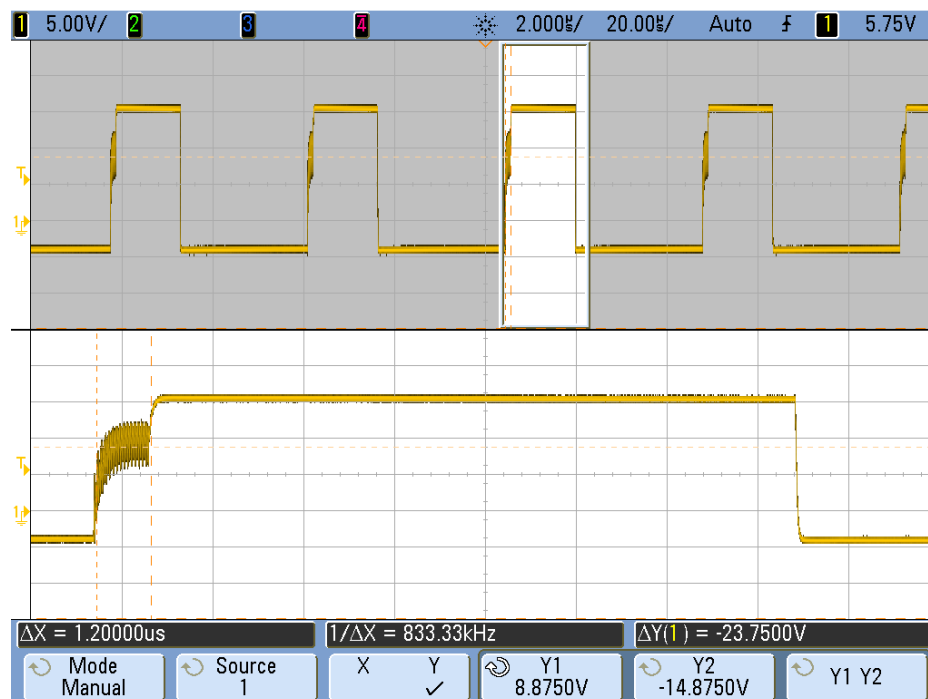


Figura 25. 30 pulsos a 25 MHz, ciclo de trabajo intercalados a 50% y 60% (promedio de 55%); señal de conmutación de 23 KHz, ciclo de trabajo 30%.

Además, en la Tabla 6 podemos ver los valores de tensión y corriente consumida por el sistema y adicionalmente se presenta el cálculo de la potencia conforme a dichos valores. Para las señales cuya frecuencia principal es de 23 KHz la diferencia es mínima, mientras que para la segunda señal que corresponde a la frecuencia principal de 100 KHz podemos observar que el sistema presenta un incremento en el consumo de corriente.

Señal	Corriente(mA)	Tensión (V)	Potencia (W)
1	58,50	12,08	0,706680
2	84,20	12,08	1,017136
3	60,20	12,08	0,727216
4	60,89	12,03	0,732507

Tabla 6. Tensión y corriente consumida por el sistema (sin SiC) para diferentes señales a la entrada del driver.

Señal 1: 20 pulsos a 25 MHz, ciclo de trabajo 50% y señal de 23 KHz, ciclo de trabajo 30%.

Señal 2: 20 pulsos a 25 MHz, ciclo de trabajo 50% y señal de 100 KHz, ciclo de trabajo 30%.

Señal 3: 15 pulsos a 25 MHz / ciclo de trabajo 60%, seguido por 15 pulsos a 25 MHz / ciclo de trabajo de 50%; y señal de conmutación de 23 KHz / ciclo de trabajo 30%.

Señal 4: 30 pulsos a 25 MHz, ciclo de trabajo intercalados a 50% y 60% (promedio de 55%); señal de conmutación de 23 KHz, ciclo de trabajo 30%.

4.2 Respuesta del Sistema con Carga Resistiva

Luego de las pruebas realizadas con el driver, se procedió a conectar los elementos restantes del sistema, incluido en este caso el transistor SiC, que es el que manejará la carga. Una vez completado el montaje se procedió a realizar las respectivas pruebas. La carga resistiva utilizada para esta evaluación consta de dos resistencias de 150 OHM conectadas en paralelo (Req.: 75 OHM).

En la Figura 26 se presenta el circuito driver y la disposición de las sondas de medida sobre los puntos de prueba y los pines del transistor. Esta disposición será la misma para las diferentes cargas con las que se evaluará el funcionamiento del sistema. Con la sonda de corriente medimos la corriente de drenador, con la sonda diferencial medimos la tensión Drenador-Surtidor y con la sonda terminada en punta (y cable de tierra en espiral) medimos la señal de entrada en la compuerta del transistor.

4.2.1 Pruebas con carga Resistiva y señal de entrada no modulada

En esta prueba se ha introducido al sistema una señal cuadrada de 23 KHz y con ciclo de trabajo de 30%. En la Figura 27 podemos observar los valores de tensión Drenador-Surtidor (V_{DS}) y corriente consumida por la carga, en base a la señal de entrada aplicada; en dicha figura se puede apreciar que existen picos de corriente en los cambios de nivel de la señal.

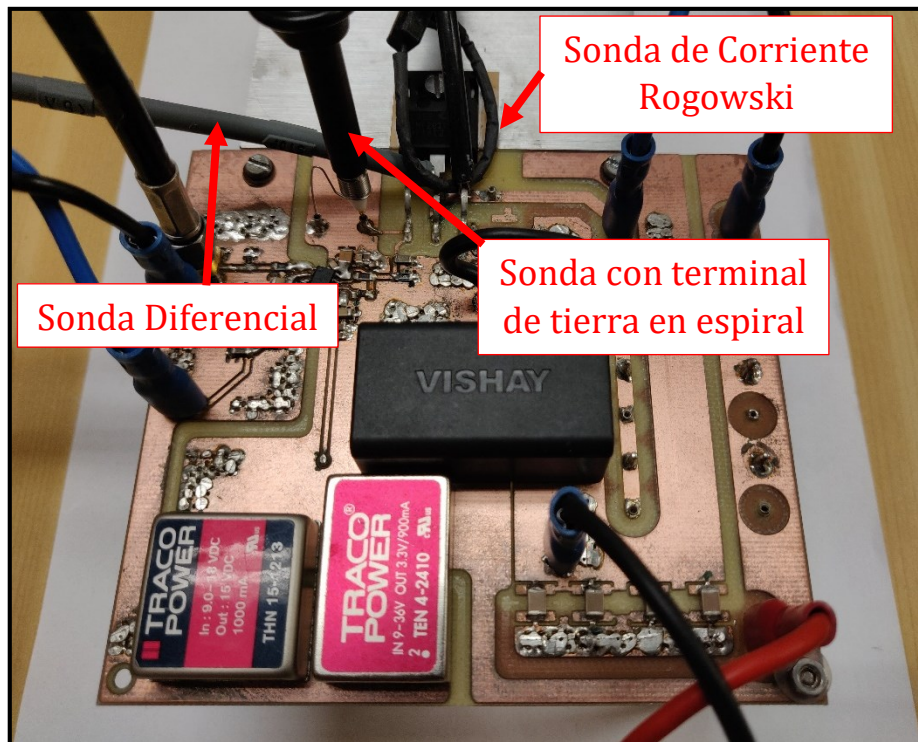


Figura 26. Disposición de sondas de medida sobre el circuito driver.

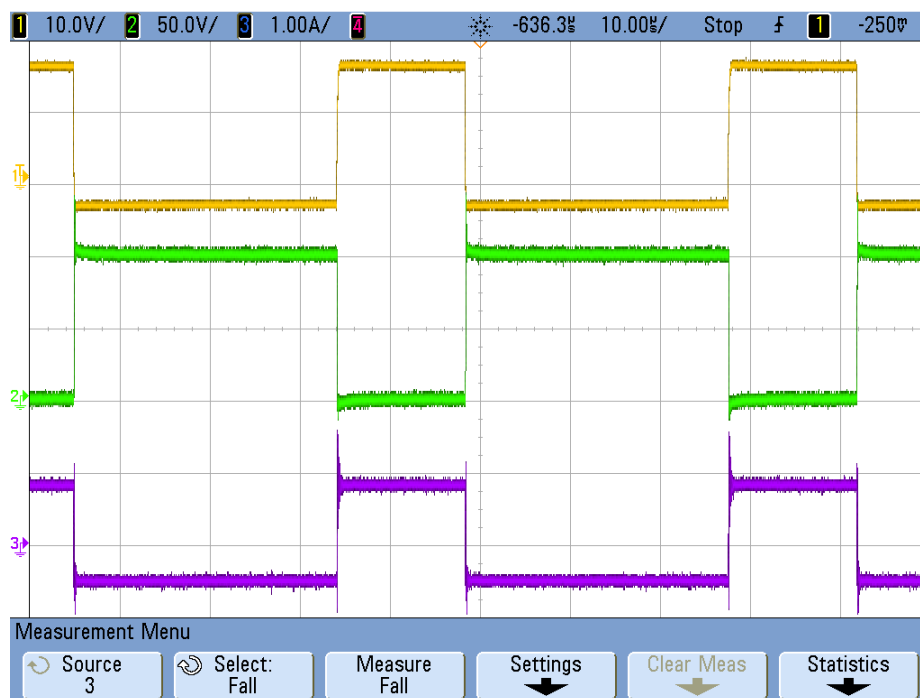


Figura 27. Respuesta carga resistiva con señal de control no modulada. Señal de entrada en amarillo, V_{DS} en verde y corriente de la carga en color azul.

Para una mejor apreciación de los valores de estos picos de corriente se ha capturado un archivo en formato CSV para poder procesarla en Matlab e

identificar el valor exacto del pico máximo de corriente al aplicar la carga resistiva al sistema. En la Figura 28 se muestra la respuesta del sistema en un plot de Matlab, en rojo tenemos la señal de entrada al driver, en azul tenemos la tensión V_{DS} y en verde la corriente de drenador, que sería la corriente consumida por dicha carga. De acuerdo a los valores en la figura, con la señal de entrada de 18,3 V, que en este caso tiene una ligera variación y llega hasta un valor máximo de 18,5 V; la tensión V_{DS} tiene un pico máximo de 111,1 V y la corriente de drenador alcanza un valor máximo de 1,98 A.

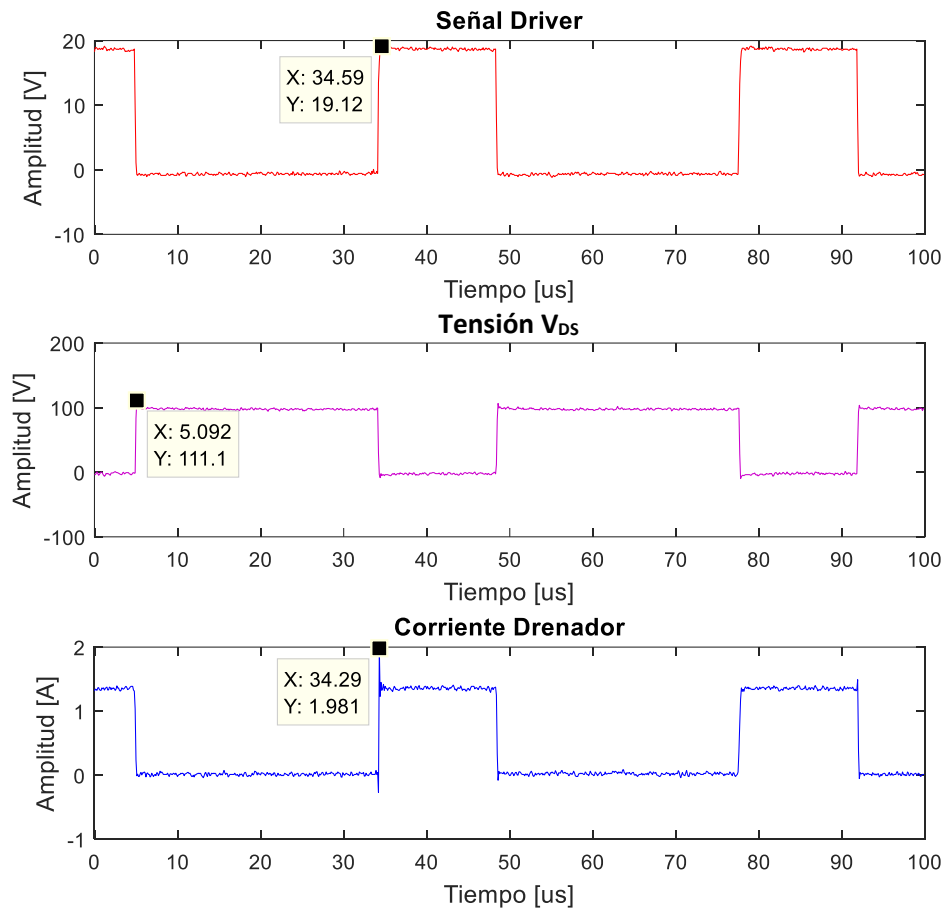


Figura 28. Plot de Matlab de la Respuesta del sistema a una carga resistiva con señal de entrada no modulada

Adicionalmente, se han analizado los tiempos de subida y bajada, tanto de la tensión drenador-surtidor como de la corriente en la carga. La Figura 29 muestra que cuando la tensión V_{DS} pasa de su valor inferior al valor superior, lo hace en un tiempo aproximado de 34 ns; mientras que, cuando la corriente pasa de su valor superior a inferior lo hace en un tiempo aproximado de 16 ns.

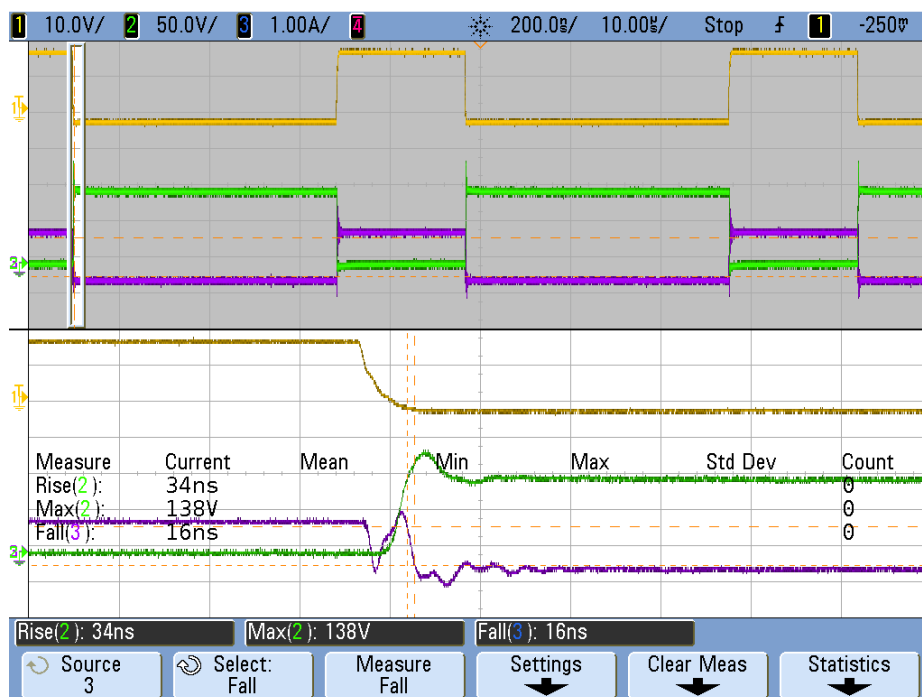


Figura 29. Tiempo de subida de la tensión V_{DS} y tiempo de bajada de la corriente para carga resistiva con señal de control no modulada.

A continuación, en la Figura 30, observamos que la tensión V_{DS} tiene un tiempo de bajada de aproximadamente 28 ns; mientras que, la corriente tiene un tiempo de subida de aproximadamente 12 ns.

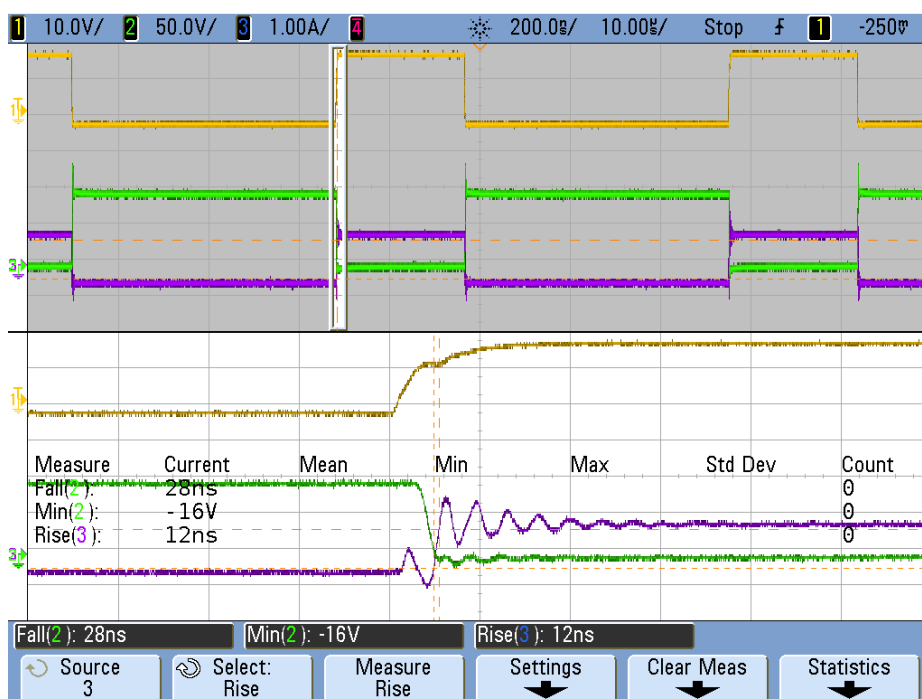


Figura 30. Tiempo de bajada de la tensión V_{DS} y tiempo de subida de la corriente para carga resistiva con señal de control no modulada.

4.2.2 Pruebas con carga Resistiva y señal de entrada modulada

Para esta prueba se ha introducido una señal modulada que en su parte inicial se ha conformado por 30 pulsos a 25 MHz con ciclos de trabajo intercalados de 50% y 60% (con lo que se consigue un ciclo de trabajo promedio de 55%); y la señal principal de conmutación es de 23 KHz con ciclo de trabajo 30%. En la Figura 31 podemos observar las señales de tensión V_{DS} y corriente consumida por la carga, en base a la señal de entrada modulada; en dicha figura se puede apreciar que existen picos de corriente en los cambios de nivel de la señal.

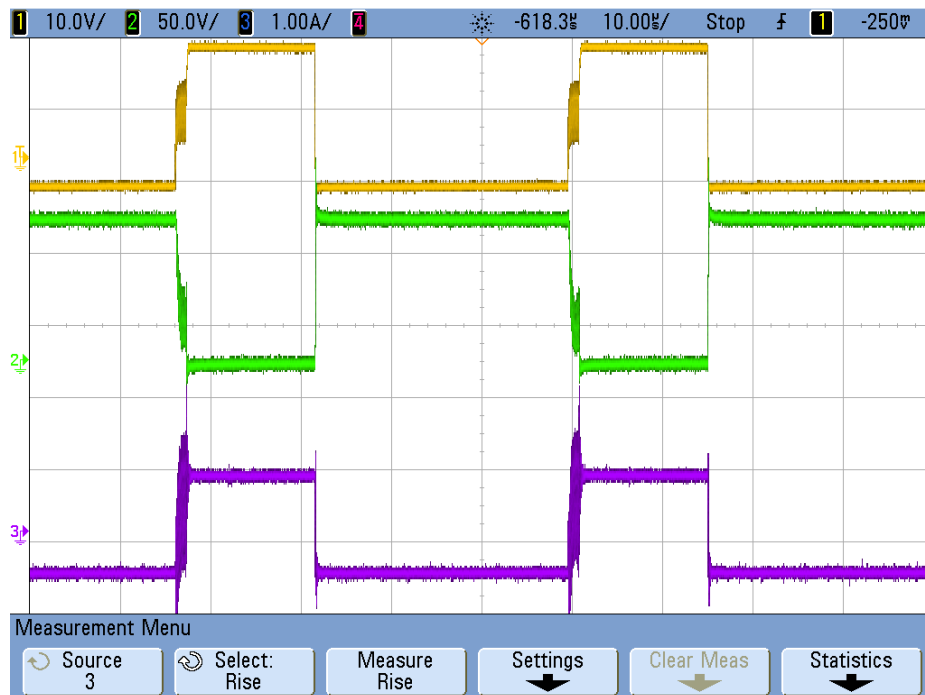


Figura 31. Carga resistiva con señal modulada de 30 pulsos a 25 MHz - ciclo de trabajo 55% y señal principal de 23 KHz - ciclo de trabajo 30%. Señal de entrada en amarillo, tensión V_{DS} en verde y corriente de la carga en color azul.

En la Figura 32 se muestra la respuesta del sistema en un plot de Matlab, en rojo tenemos la señal de entrada al driver, en azul tenemos la tensión V_{DS} y en verde la corriente de drenador, que sería la corriente consumida por dicha carga. De acuerdo a los valores en la figura, con la señal de entrada de 17,6 V; la tensión V_{DS} tiene un pico máximo de 125,4 V y la corriente de drenador alcanza un valor máximo de 2,27 A.

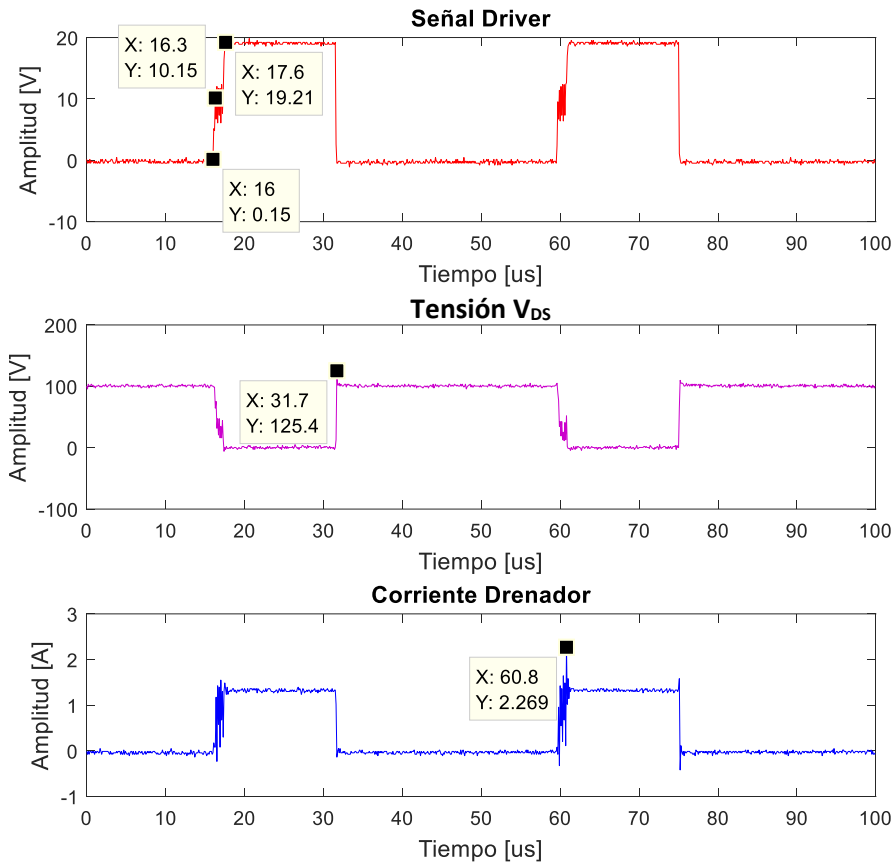


Figura 32. Plot (realizado en MatLab) de la respuesta del sistema para la carga resistiva de 75 OHM y señal de entrada modulada.

En este caso también se han analizado los tiempos de subida y bajada, tanto de la tensión V_{DS} como de la corriente en la carga. La Figura 33 muestra que cuando la tensión V_{DS} pasa de su valor inferior al valor superior, lo hace en un tiempo aproximado de 32 ns; mientras que, cuando la corriente pasa de su valor superior a inferior lo hace en un tiempo aproximado de 16 ns.

Continuando el análisis de tiempos de subida y bajada, en la Figura 34 observamos que, debido a la inserción de los pulsos iniciales, la tensión V_{DS} tiene un tiempo de bajada de aproximadamente 575 ns; mientras que, el tiempo de subida de la corriente no ha podido definirse con claridad en el osciloscopio.

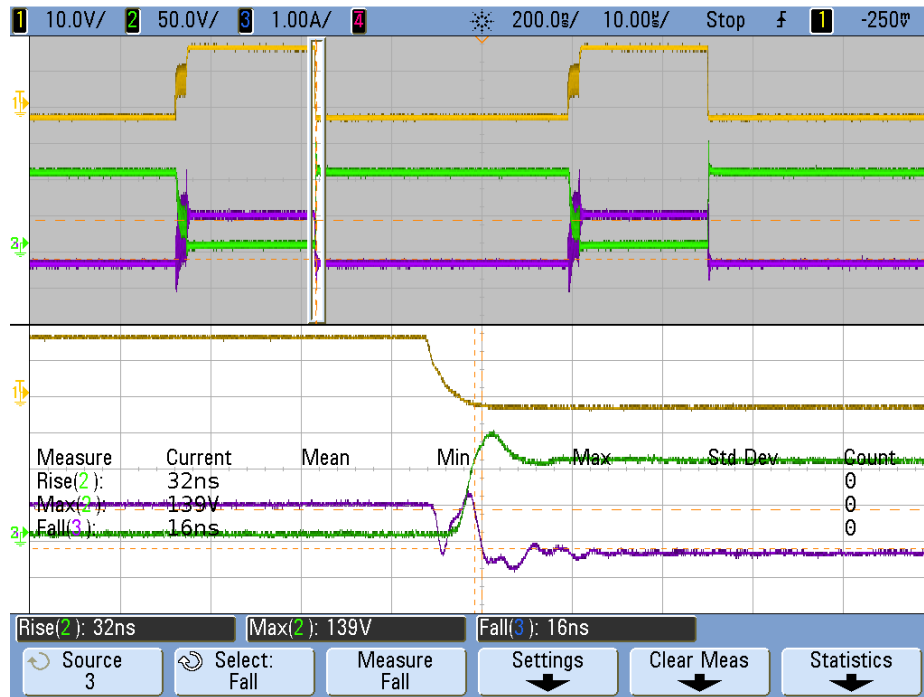


Figura 33. Tiempo de subida de la tensión V_{DS} y tiempo de bajada de la corriente para carga resistiva con señal de control modulada.

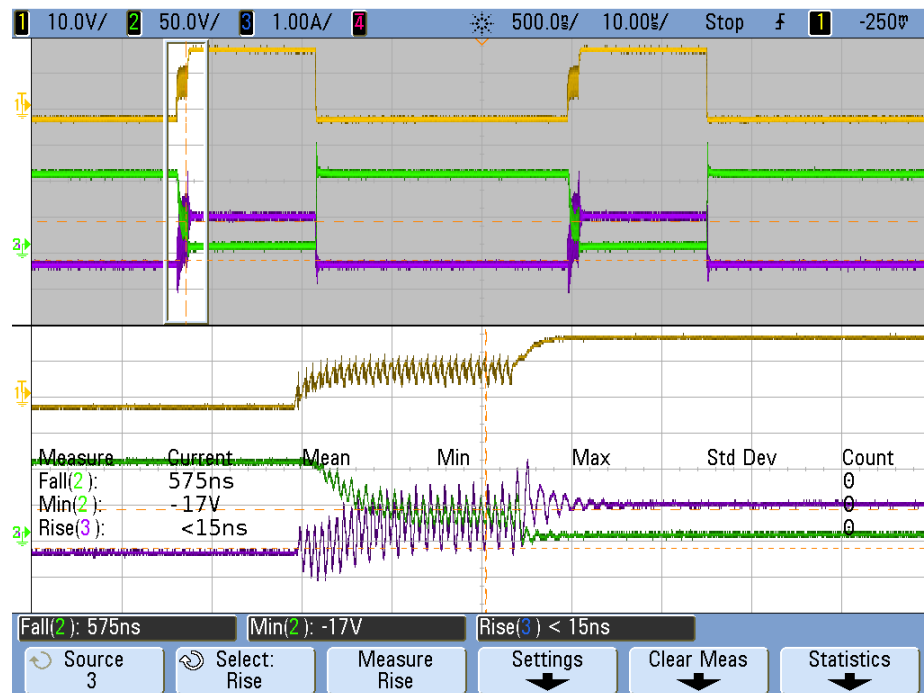


Figura 34. Tiempo de bajada de la tensión de la carga y tiempo de subida de la corriente para carga resistiva con señal de control no modulada.

4.2.3 Análisis de resultados de pruebas con carga Resistiva

De acuerdo a los resultados observados, hemos visto cómo se comporta nuestro sistema ante cargas resistivas, hemos visto cómo se manejan los consumos de corriente y los picos máximos que puede soportar.

4.3 Evaluación del sistema completo con recipiente ferromagnético

Luego de realizadas las pruebas con carga resistiva se conectó al sistema la bobina de inducción sobre la cual irán los recipientes. Adicionalmente se han colocado dos condensadores de resonancia necesarios para trabajar con recipiente ferromagnético, que para este caso tienen un valor de 47nF cada uno.

En la Figura 35 tenemos la bobina de inducción que se utilizó para todos los experimentos del sistema.

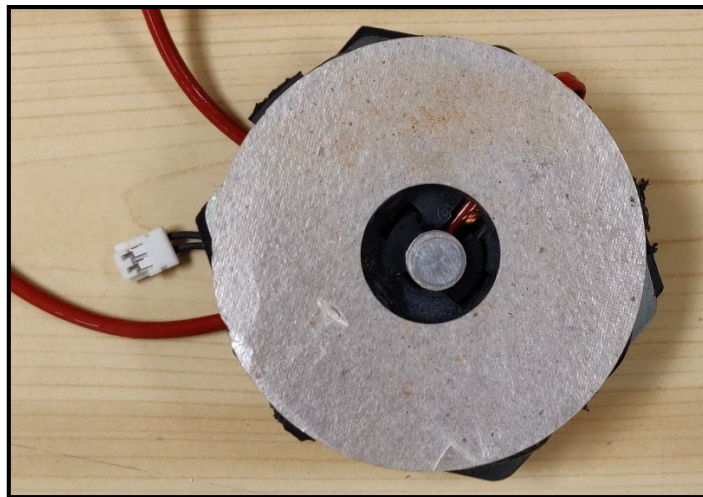


Figura 35. Bobina de inducción sobre la cual se colocarán los recipientes para evaluar el funcionamiento del sistema.

En la Figura 36 tenemos el recipiente ferromagnético con el cual se han realizado las pruebas de este apartado.



Figura 36. Cafetera de material ferromagnético utilizada para probar el sistema.

4.3.1 Pruebas con señal de entrada no modulada

En esta prueba se ha introducido al sistema una señal cuadrada de 23 KHz y con ciclo de trabajo de 30%. Se ha realizado con dos niveles de tensión, primero de 75 V y luego con 170 V.

Con tensión de ingreso de 75 V.

En la Figura 37 observamos la respuesta del sistema cuando se ha colocado sobre la bobina de inducción un recipiente de material ferromagnético y cuando se establecido una señal de control no modulada. La tensión de bus se ha establecido en 75 V. La señal de entrada se muestra en amarillo, la tensión V_{DS} aparece en color verde, la corriente de drenador en azul y corriente de la carga en color rojo. Se observa que la conmutar el transistor la corriente de drenador alcanza un pico máximo de 19 A.

Para el caso de la Figura 38 se tiene una vista ampliada de la tensión V_{DS} en verde y de la corriente de drenador en azul. Se observa el ringing en la señal de corriente cuando el transistor conmuta. Adicionalmente, se ha medido la frecuencia del ringing generado, el cual toma un valor de alrededor de 1,6 MHz.

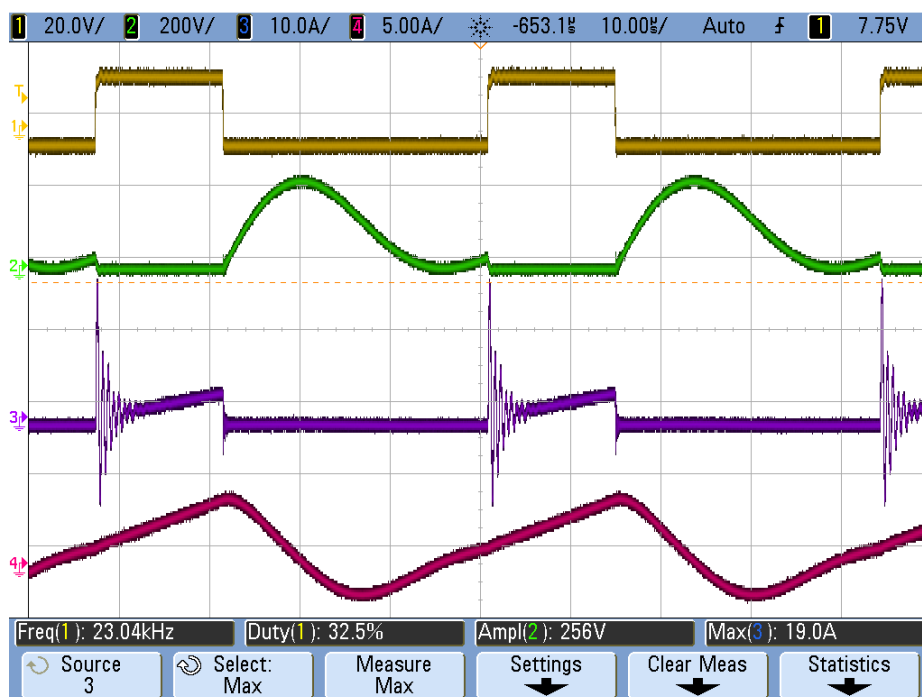


Figura 37. Respuesta carga de material ferromagnético, con señal de control no modulada. Señal de entrada en amarillo, tensión de la carga en verde, corriente de drenador en azul y corriente de la carga en color rojo. Tensión de bus de 75 V.

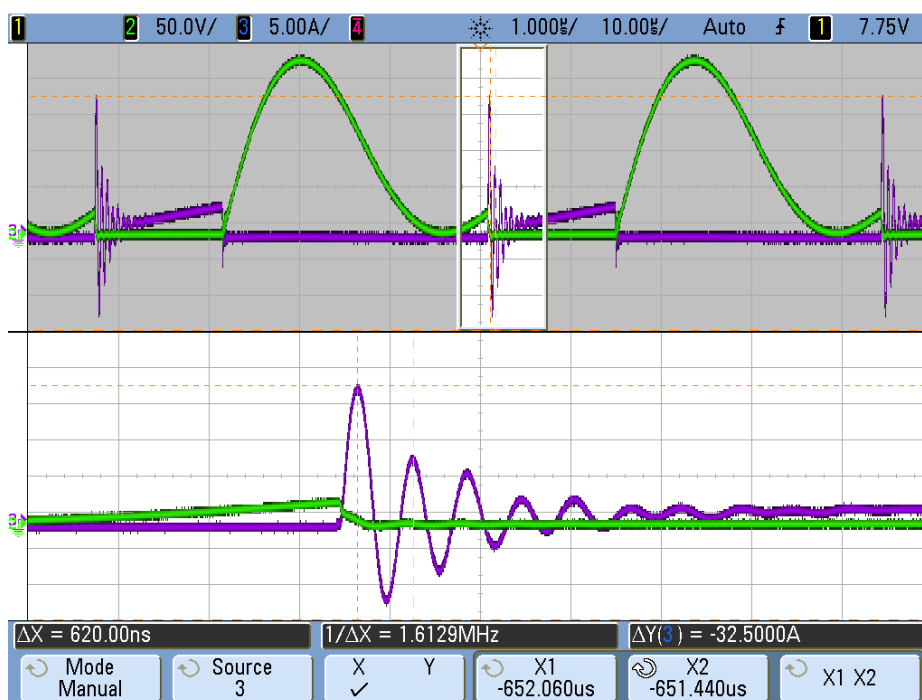


Figura 38. Vista ampliada de respuesta con carga de material ferromagnético, con señal de control no modulada; tensión V_{DS} en verde y corriente de drenador en azul. Tensión de bus de 75 V.

Con tensión de 170V

En este caso la tensión de bus es de 170 V. La respuesta del sistema para esta variante de tensión de bus se muestra en la Figura 39. La señal de entrada se muestra en amarillo, la tensión V_{DS} aparece en color verde, la corriente de drenador en azul y corriente de la carga en color rojo. Se observa que al conmutar el transistor la corriente de drenador alcanza un máximo de 33,3 A.

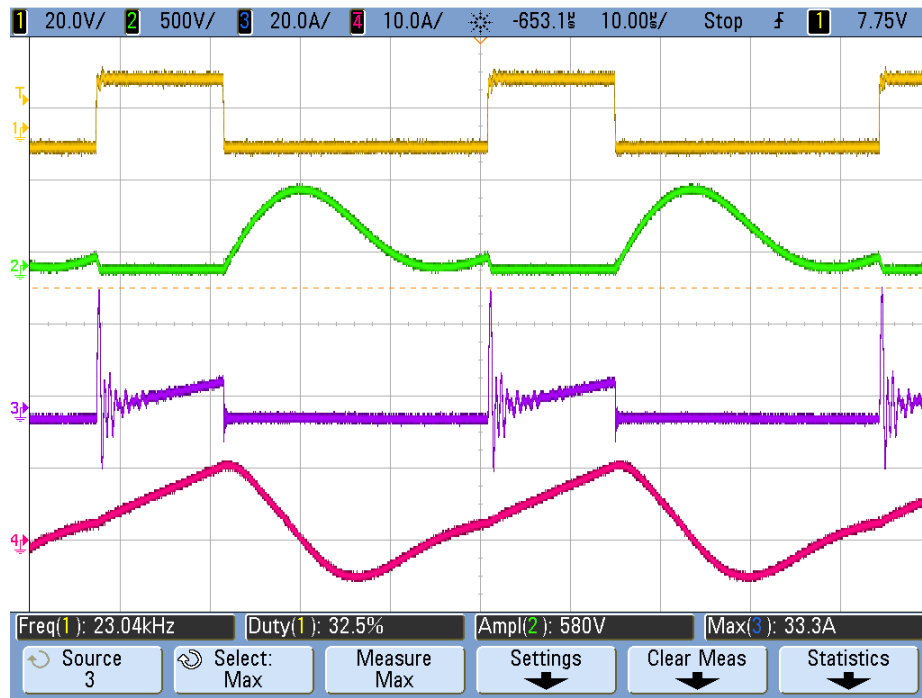


Figura 39. Respuesta carga de material ferromagnético, con señal de control no modulada. Señal de entrada en amarillo, tensión V_{DS} en verde, corriente de drenador en azul y corriente de la carga en color rojo. Tensión de bus de 170 V.

En la Figura 40 se presenta una vista ampliada de la tensión V_{DS} en verde y de la corriente de drenador en azul. Se observa el ringing en la señal de corriente cuando el transistor conmuta, el cual presenta una frecuencia de alrededor de 1,6 MHz.

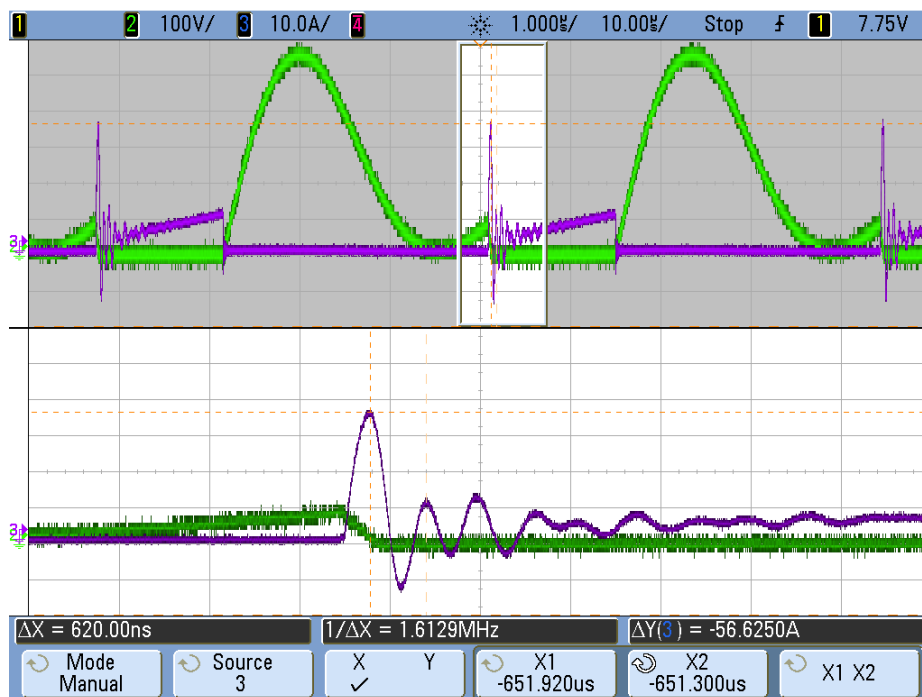


Figura 40. Vista ampliada de respuesta con carga de material ferromagnético, con señal de control no modulada; tensión V_{DS} en verde y corriente de drenador en azul. Tensión de bus de 170 V.

4.3.2 Pruebas con señal de entrada modulada 30 pulsos a 25 MHz ciclo de trabajo 55% y 23 KHz ciclo de trabajo 30%

Para esta prueba se ha introducido una señal modulada que en su parte inicial se ha conformado por 30 pulsos a 25 MHz con ciclos de trabajo intercalados de 50% y 60% (con lo que se consigue un ciclo de trabajo promedio de 55%); y la señal principal de conmutación es de 23 KHz con ciclo de trabajo 30%.

Con tensión de 75 V

En la Figura 41 se muestra la respuesta del sistema para la señal de entrada modulada descrita. La señal de entrada se muestra en amarillo, la tensión V_{DS} aparece en color verde, la corriente de drenador en azul y la corriente de la carga en color rojo. Se observa que, al conmutar el transistor, la corriente de drenador alcanza un pico máximo de 4,3 A.

En la Figura 42 se presenta una vista ampliada de la tensión V_{DS} en verde y de la corriente de drenador en azul. Se observa el ringing en la señal de corriente cuando el transistor conmuta, el cual presenta una frecuencia de 25 MHz correspondiente a la frecuencia de los pulsos de modulación introducidos.

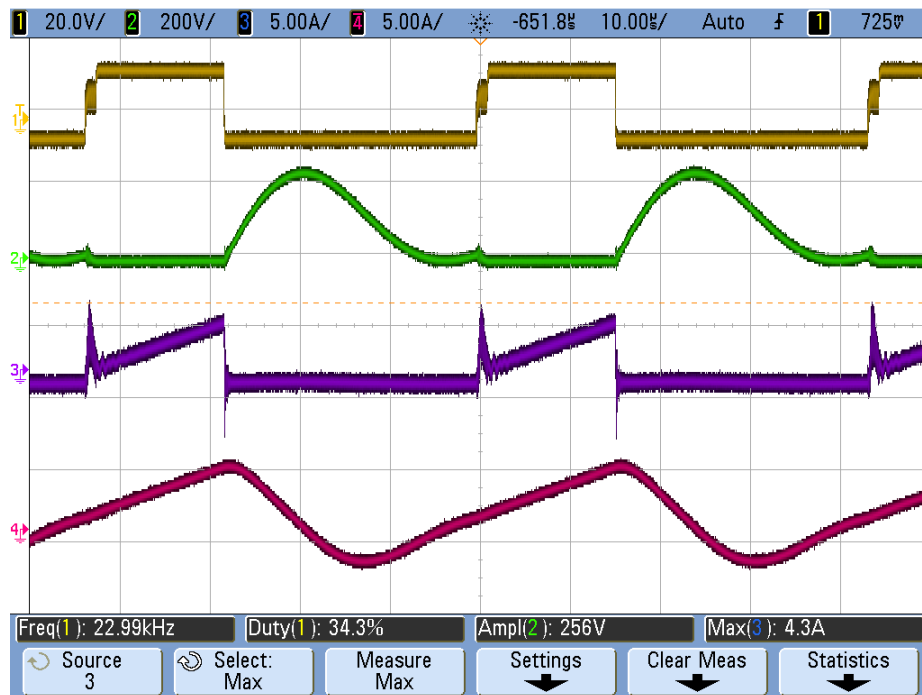


Figura 41. Respuesta carga de material ferromagnético, con señal de control modulada; 30 pulsos a 25 MHz ciclo de trabajo 55% y 23 KHz ciclo de trabajo 30%. Señal de entrada en amarillo, tensión V_{DS} en verde, corriente de drenador en azul y corriente de la carga en color rojo. Tensión de bus de 75 V.

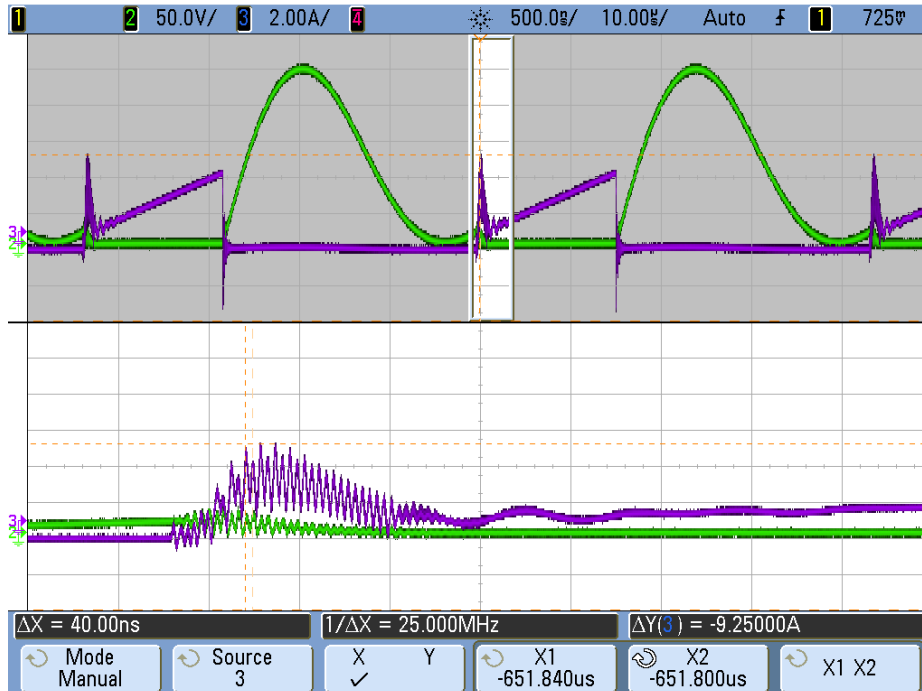


Figura 42. Vista ampliada de respuesta con carga de material ferromagnético, con señal de control modulada; 30 pulsos a 25 MHz ciclo de trabajo 55% y 23 KHz ciclo de trabajo 30%. Tensión V_{DS} en verde, corriente de drenador en azul. Tensión de bus de 75 V.

Con tensión de 170 V

En este caso la tensión de bus es de 170 V. La respuesta del sistema para esta variante de tensión de bus se muestra en la Figura 43. La señal de entrada se muestra en amarillo, la tensión V_{DS} aparece en color verde, la corriente de drenador en azul y corriente de la carga en color rojo. Se observa que al conmutar el transistor la corriente de drenador alcanza un máximo de 11,9 A.

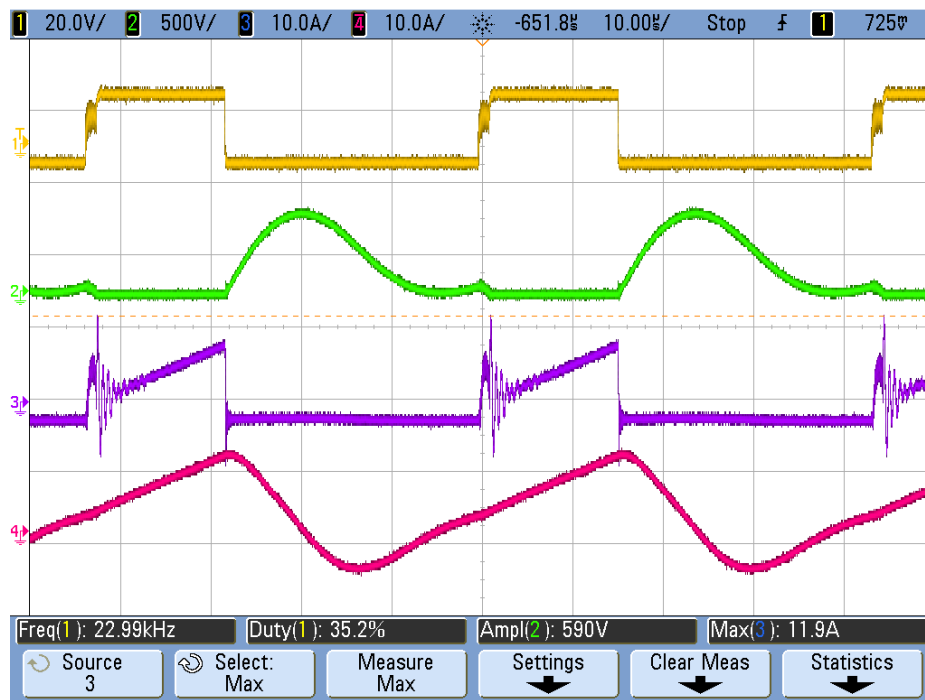


Figura 43. Respuesta carga de material ferromagnético, con señal de control modulada; 30 pulsos a 25 MHz con ciclo de trabajo 55% y 23 KHz ciclo de trabajo 30%. Señal de entrada en amarillo, tensión V_{DS} en verde, corriente de drenador en azul y corriente de la carga en color rojo. Tensión de bus de 170 V.

En la Figura 44 se presenta una vista ampliada de la tensión V_{DS} en verde y de la corriente de drenador en azul. Se observa el ringing en la señal de corriente cuando el transistor conmuta, el cual presenta una frecuencia de 25 MHz correspondiente a la frecuencia de los pulsos de modulación introducidos.

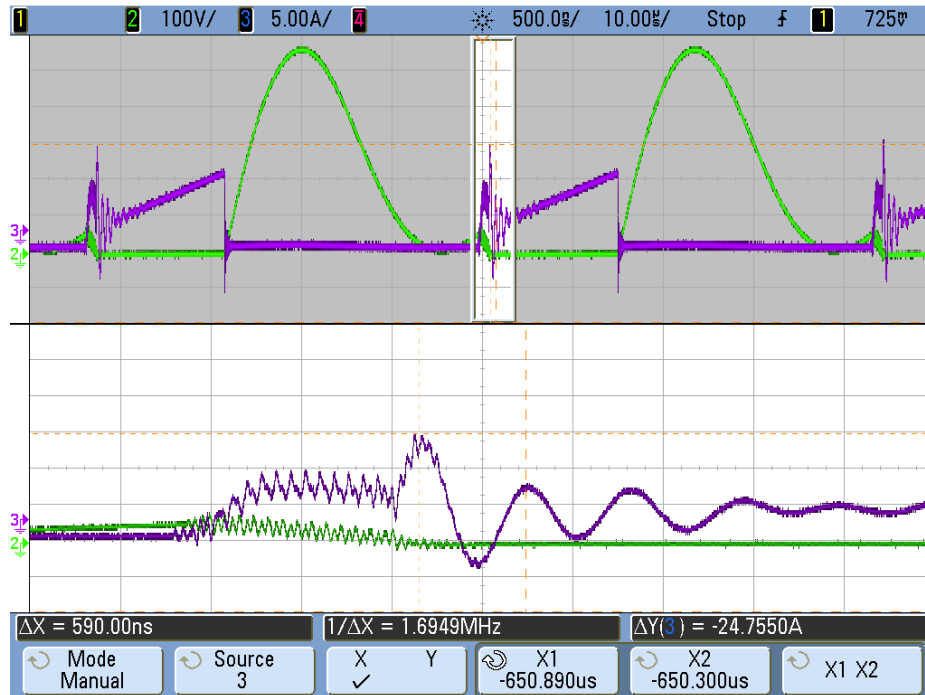


Figura 44. Vista ampliada de respuesta con carga de material ferromagnético, con señal de control modulada; 30 pulsos a 25 MHz ciclo de trabajo 55% y 23 KHz ciclo de trabajo 30%. Tensión V_{DS} en verde, corriente de drenador en azul. Tensión de bus de 170 V.

4.3.3 Pruebas con señal de entrada modulada 35 pulsos a 25 MHz ciclo de trabajo 55% y 23 KHz ciclo de trabajo 30%

Con tensión de 170 V

En este caso, presentadas las características en la Figura 45, observamos que el pico de corriente máximo disminuye con respecto al caso anterior

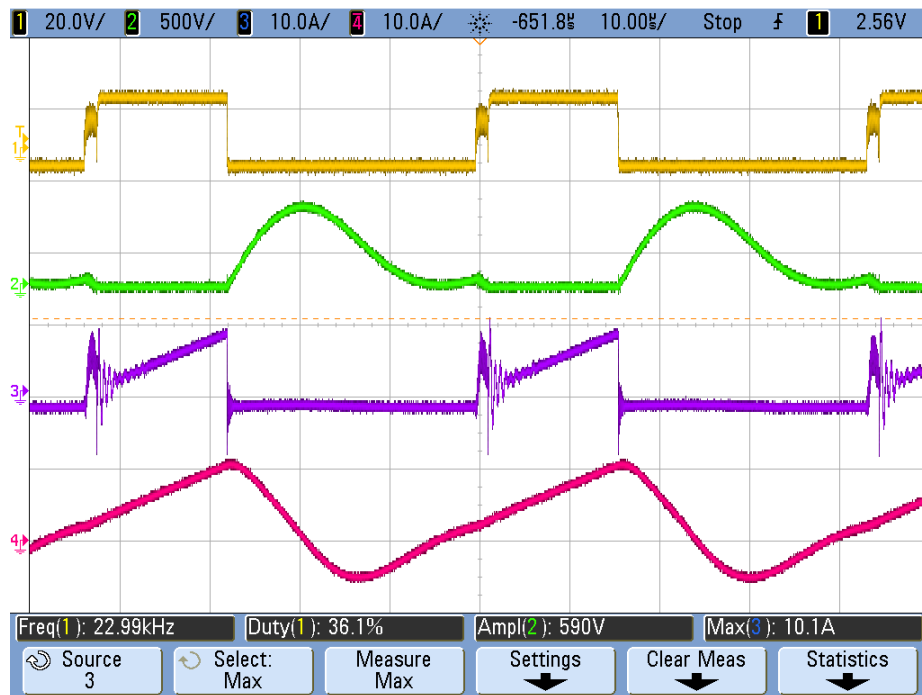


Figura 45. Respuesta carga de material ferromagnético, con señal de control modulada; 35 pulsos a 25 MHz ciclo de trabajo 55% y 23 KHz ciclo de trabajo 30%. Señal de entrada en amarillo, tensión de la carga en verde, corriente de drenador en azul y corriente de la carga en color rojo. Tensión de bus de 170 V.

4.3.4 Pruebas con señal de entrada modulada 40 pulsos a 25 MHz ciclo de trabajo 55% y 23 KHz ciclo de trabajo 30%

Con tensión de 170 V

En este caso, presentadas las características en la Figura 46, observamos que el pico de corriente máximo disminuye con respecto al caso anterior

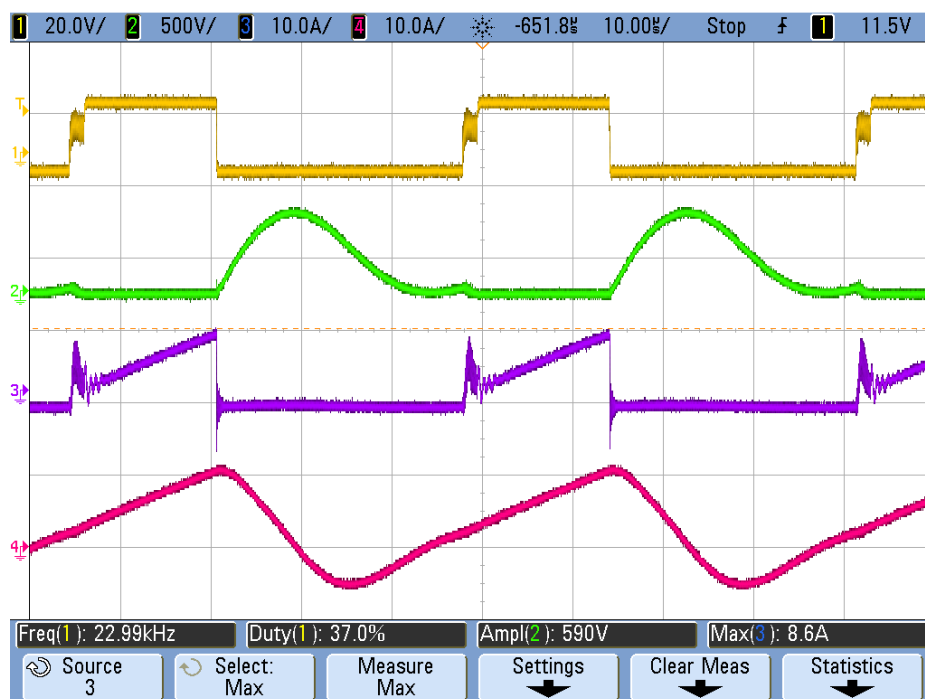


Figura 46. Respuesta carga de material ferromagnético, con señal de control modulada; 40 pulsos a 25 MHz ciclo de trabajo 55% y 23 KHz ciclo de trabajo 30%. Señal de entrada en amarillo, tensión de la carga en verde, corriente de drenador en azul y corriente de la carga en color rojo. Tensión de bus de 170 V.

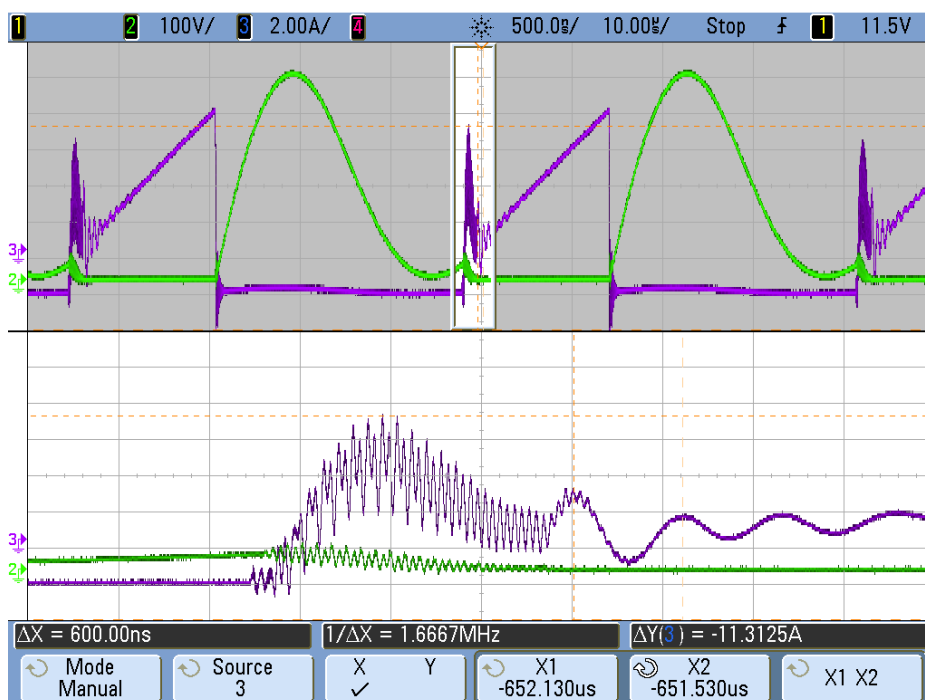


Figura 47. Vista ampliada de respuesta con carga de material ferromagnético, con señal de control modulada; 40 pulsos a 25 MHz ciclo de trabajo 55% y 23 KHz ciclo de trabajo 30%. Tensión de la carga en verde, corriente de drenador en azul. Tensión de bus de 170 V.

4.3.5 Pruebas con señal de entrada modulada 45 pulsos a 25 MHz ciclo de trabajo 55% y 23 KHz ciclo de trabajo 30%

Con tensión de 170 V

Vemos que ya no se ve una mejora en la respuesta aumentando el número de pulsos.



Figura 48. Respuesta carga de material ferromagnético, con señal de control modulada; 45 pulsos a 25 MHz ciclo de trabajo 55% y 23 KHz ciclo de trabajo 30%. Señal de entrada en amarillo, tensión de la carga en verde, corriente de drenador en azul y corriente de la carga en color rojo. Tensión de bus de 170 V.

4.4 Evaluación del sistema completo con recipiente de aluminio

El recipiente de aluminio que se utilizará para llevar a cabo las pruebas se muestra en la figura siguiente. Este tiene un tamaño de menos de la mitad del recipiente ferromagnético con el que se hicieron las pruebas del apartado anterior. Para las pruebas con el recipiente de aluminio, se han cambiado los condensadores de resonancia, en este caso se han conectado dos condensadores de 4,7nF en paralelo.



Figura 49. Cafetera de aluminio utilizada para probar el sistema.

4.4.1 Pruebas con señal de entrada no modulada de 100 KHz ciclo de trabajo 50%

Tensión de 170V

En la Figura 50 se presenta la respuesta del sistema cuando se ha colocado en la bobina de inducción un recipiente de aluminio y con una señal de control no Se observa la señal de entrada en amarillo, la tensión V_{DS} en azul, corriente de drenador en verde y corriente de la carga en color rojo. Notamos que para este caso la corriente de drenador alcanza un valor máximo de 10,3 A y que no existen picos de corriente cuando el transistor conmuta, ya que nos encontramos en un punto de trabajo óptimo.

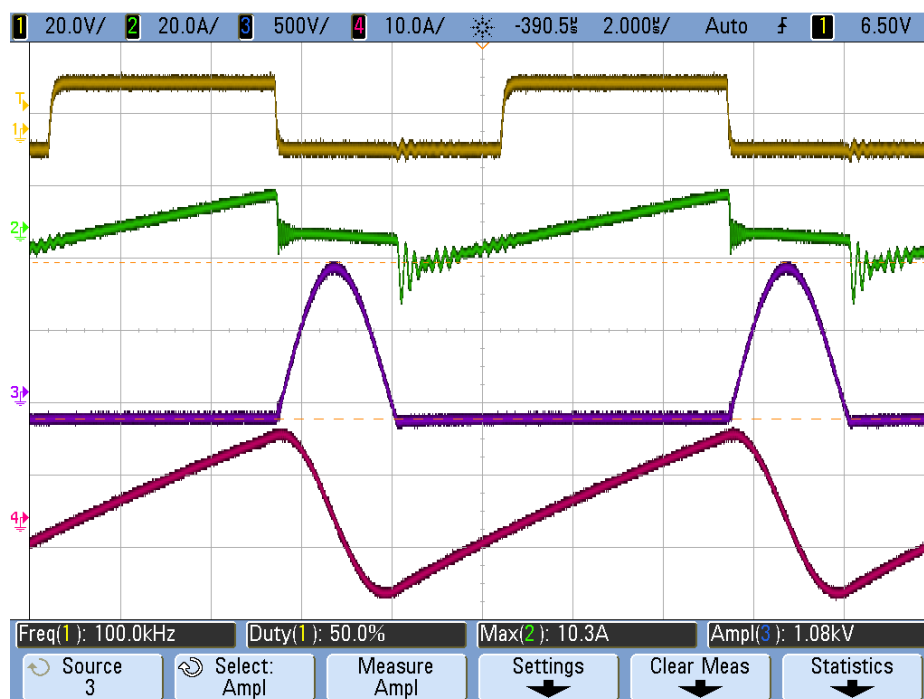


Figura 50. Respuesta recipiente de aluminio, con señal de control no modulada; 100 KHz ciclo de trabajo 50%. Señal de entrada en amarillo, tensión V_{DS} en azul, corriente de drenador en verde y corriente de la carga en color rojo. Tensión de bus de 170 V.

4.4.2 Pruebas con señal de entrada modulada 20 pulsos a 25 MHz ciclo de trabajo 55% y 100 KHz ciclo de trabajo 50%

Tensión de 170V

En la Figura 51 tenemos la respuesta del sistema para el recipiente de aluminio cuando se tiene una señal de control modulada. Se presenta la señal de control en amarillo, tensión V_{DS} en azul, corriente de drenador en verde y corriente de la carga en color rojo. Al igual que en el caso de señal de control no modulada, no se notan picos de corriente y la corriente de drenador no supera los 10,1 A.

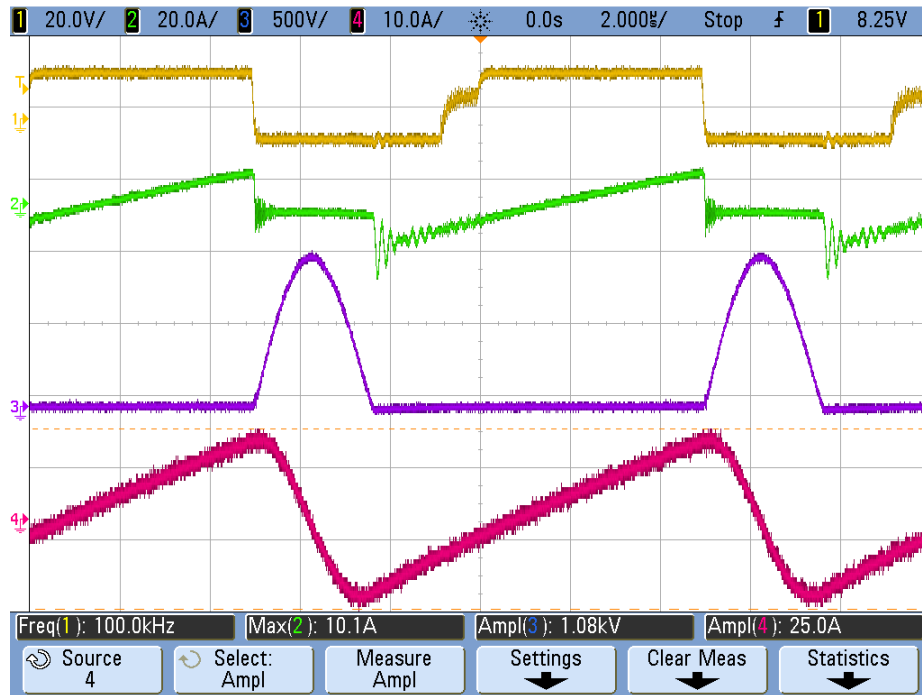


Figura 51. Respuesta recipiente de aluminio, con señal de control modulada; 20 pulsos a 25 MHz ciclo de trabajo 55% y 100 KHz ciclo de trabajo 50%. Señal de control en amarillo, tensión V_{DS} en azul, corriente de drenador en verde y corriente de la carga en color rojo. Tensión de bus de 170 V.

4.5 Análisis de la Eficiencia del Sistema

4.5.1 Potencia del sistema con señal de control no modulada y carga recipiente ferromagnético

Señal de control de 23 KHz y ciclo de trabajo 30%

Dada la señal de entrada al circuito driver, se han medido las tensión y corriente de ingreso al circuito driver y simultáneamente se han medido la tensión y la corriente en la carga, que en este caso es un recipiente de material ferromagnético.

Entrada

La Figura 52 corresponde a la tensión y la corriente medidas desde la fuente hacia el circuito driver cuando se ha conectado la carga de material ferromagnético. En amarillo podemos ver la tensión de bus, la cual se ha establecido en 170V DC y en verde tenemos la corriente entregada. En color morado tenemos la estimación de la señal de potencia entregada por esta fuente, cuyo valor se ha calculado en el osciloscopio y nos muestra un valor de 340,1 W.

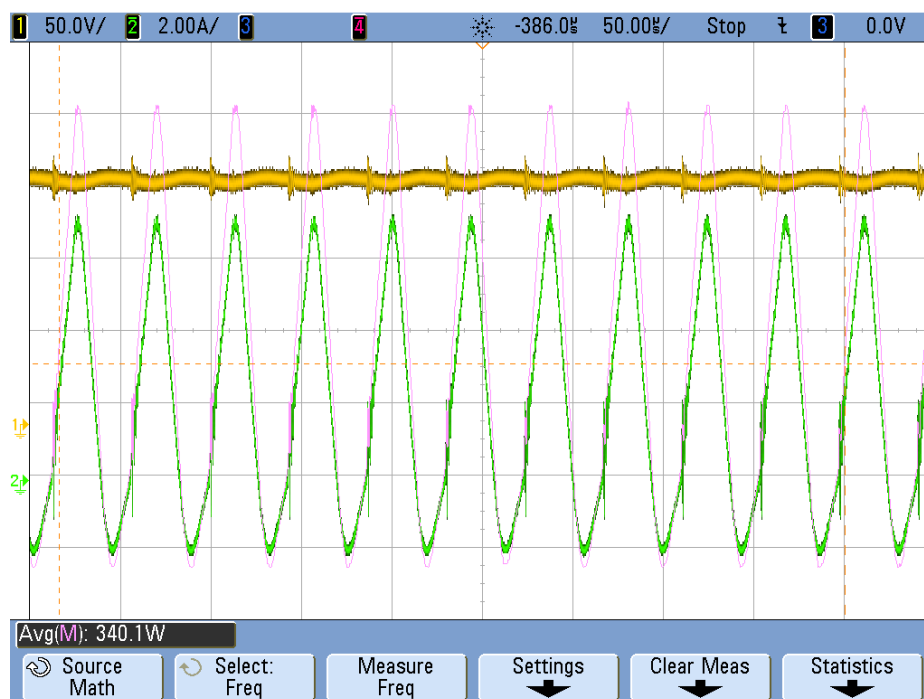


Figura 52. Estimación de la potencia de entrada al sistema para una carga de material ferromagnético y con señal de control no modulada de 23 KHz ciclo de trabajo 30%.

Salida

La Figura 53 corresponde a la tensión y la corriente medida en la carga formada por la bobina de inducción y el recipiente de material ferromagnético, para el caso de una señal de control no modulada de 23 KHz ciclo de trabajo 30%. En azul podemos ver la tensión de la carga y en rojo tenemos la corriente de la carga. En color morado tenemos la estimación de la señal de potencia consumida por esta carga, cuyo valor se ha calculado en el osciloscopio y nos muestra un valor de 314,8 W.

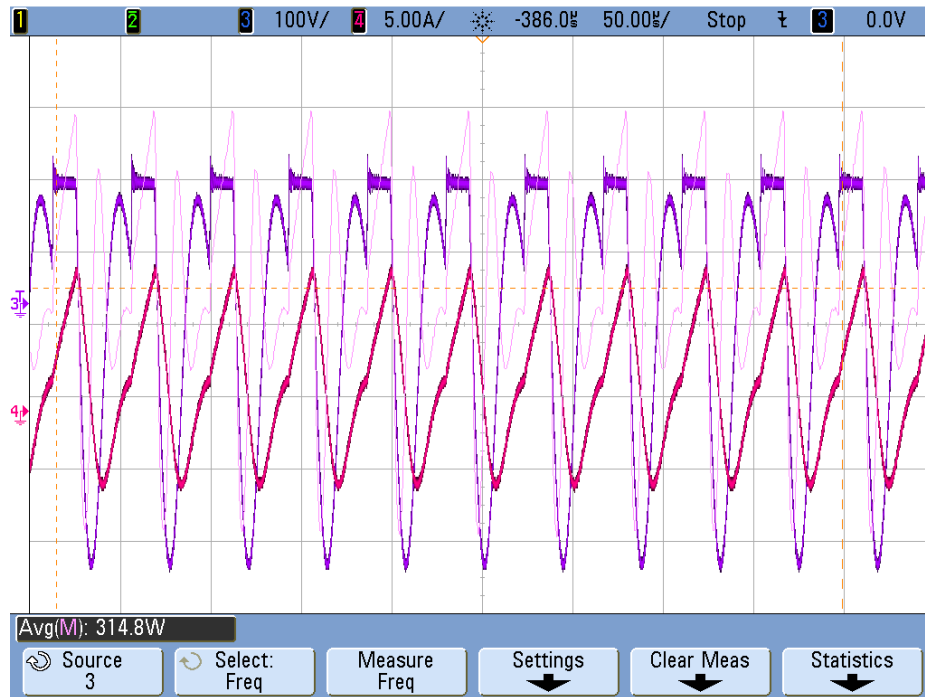


Figura 53. Estimación de la potencia entregada por el sistema hacia una carga con recipiente de material ferromagnético y con señal de control no modulada de 23 KHz ciclo de trabajo 30%.

Análisis de Eficiencia

$$\eta_{(\%)} = \frac{P_{salida}}{P_{entrada}} \cdot 100\%$$

$$\eta_{(\%)} = \frac{314,8 \text{ W}}{340,1 \text{ W}} \cdot 100\%$$

$$\eta_{(\%)} = 92,5 \%$$

4.5.2 Potencia del sistema con señal de control modulada y recipiente ferromagnético

Señal modulada de 40 pulsos a 25 MHz con ciclo de trabajo 55% y señal principal de 23 KHz con ciclo de trabajo del 30%

Entrada

La Figura 54 corresponde a la tensión y la corriente medidas desde la fuente hacia el circuito driver cuando se ha conectado una carga formada por la bobina de inducción y el recipiente de material ferromagnético y se ha utilizado una señal de control modulada de 40 pulsos a 25 MHz, ciclo de trabajo de 55% y señal de conmutación de 23 KHz ciclo de trabajo 30%. En amarillo podemos ver la tensión de bus, la cual se ha establecido en 170V DC y en verde tenemos la

corriente entregada. En color morado tenemos la estimación de la señal de potencia entregada por esta fuente, cuyo valor se ha calculado en el osciloscopio y nos muestra un valor de 389,5 W.

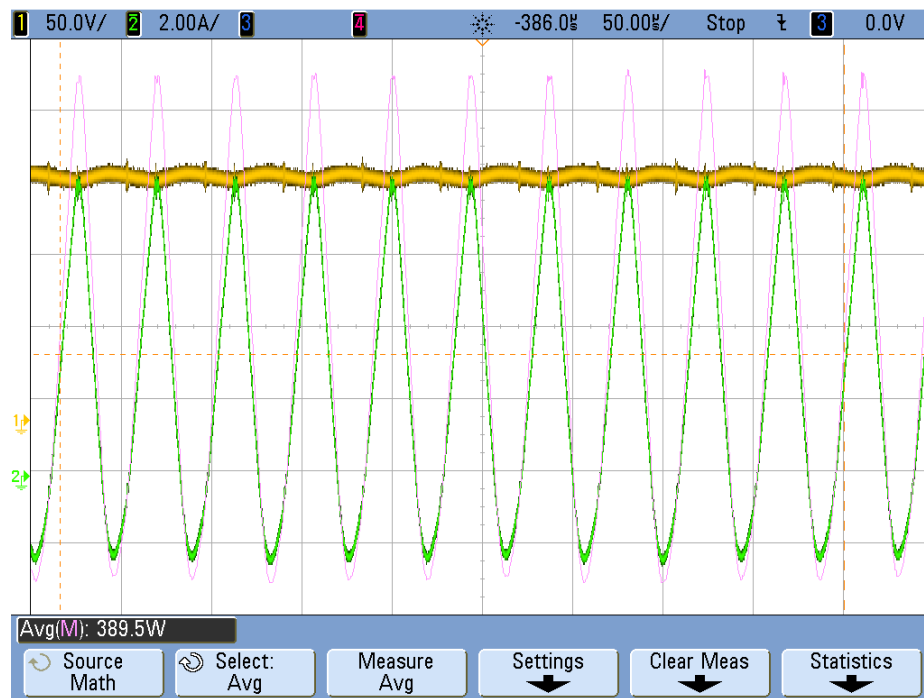


Figura 54. Estimación de la potencia de entrada al sistema para una carga de material ferromagnético y con señal de control modulada de 40 pulsos a 25 MHz, ciclo de trabajo de 55% y señal de conmutación de 23 KHz ciclo de trabajo 30%.

Salida

La Figura 55 corresponde a la tensión y la corriente medida en la carga formada por la bobina de inducción y el recipiente de material ferromagnético, para el caso de una señal de control modulada. En azul podemos ver la tensión de la carga y en rojo tenemos la corriente de la carga. En color morado tenemos la estimación de la señal de potencia consumida por esta carga, cuyo valor se ha calculado en el osciloscopio y nos muestra un valor de 373,3 W.

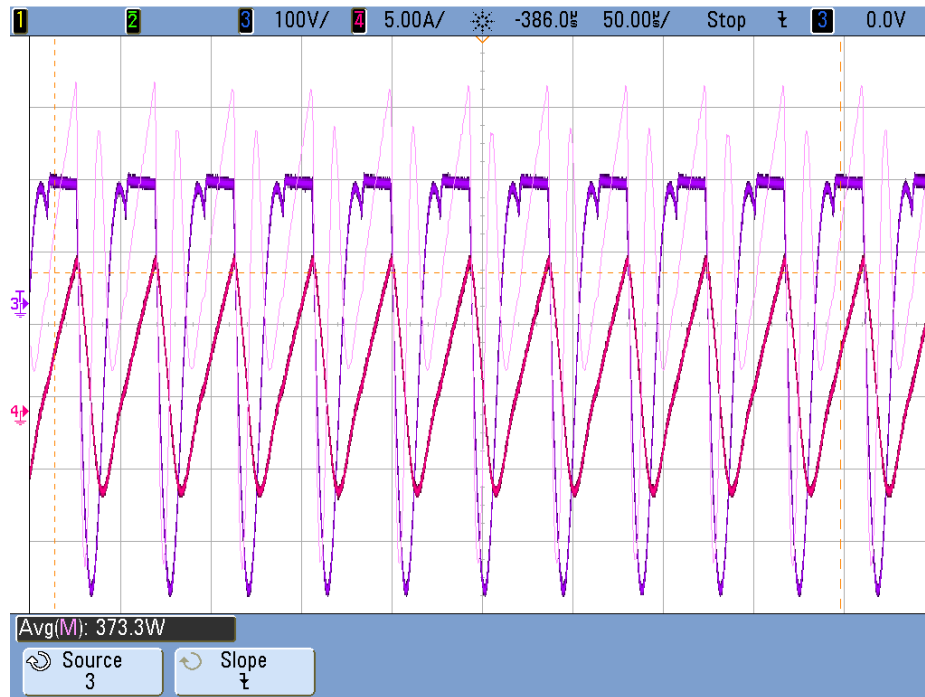


Figura 55. Estimación de la potencia entregada por el sistema hacia una carga de material ferromagnético y con señal de control modulada de 40 pulsos a 25 MHz, ciclo de trabajo de 55% y señal de conmutación de 23 KHz ciclo de trabajo 30%.

Análisis de Eficiencia

Dadas las potencias de entrada y salida estimadas por el osciloscopio, calculamos la eficiencia del sistema.

$$\eta_{(\%)} = \frac{P_{salida}}{P_{entrada}} \cdot 100\%$$

$$\eta_{(\%)} = \frac{373,3 \text{ W}}{389,5 \text{ W}} \cdot 100\%$$

$$\eta_{(\%)} = 95,8 \%$$

Señal modulada 40 pulsos a 25 MHz con ciclo de trabajo 55% y señal principal de 25 KHz con ciclo de trabajo del 40%. Tensión de bus de 170 V.

Entrada

La Figura 56 corresponde a la tensión y la corriente medidas desde la fuente hacia el circuito driver cuando se ha utilizado un recipiente de material ferromagnético y se ha utilizado una señal de control modulada de 40 pulsos a

25 MHz, ciclo de trabajo de 55% y señal de conmutación de 25 KHz ciclo de trabajo 40%. En amarillo podemos ver la tensión de bus, la cual se ha establecido en 170V DC y en verde tenemos la corriente entregada. En color morado tenemos la estimación de la señal de potencia entregada por esta fuente, cuyo valor se ha calculado en el osciloscopio y nos muestra 319,9 W.

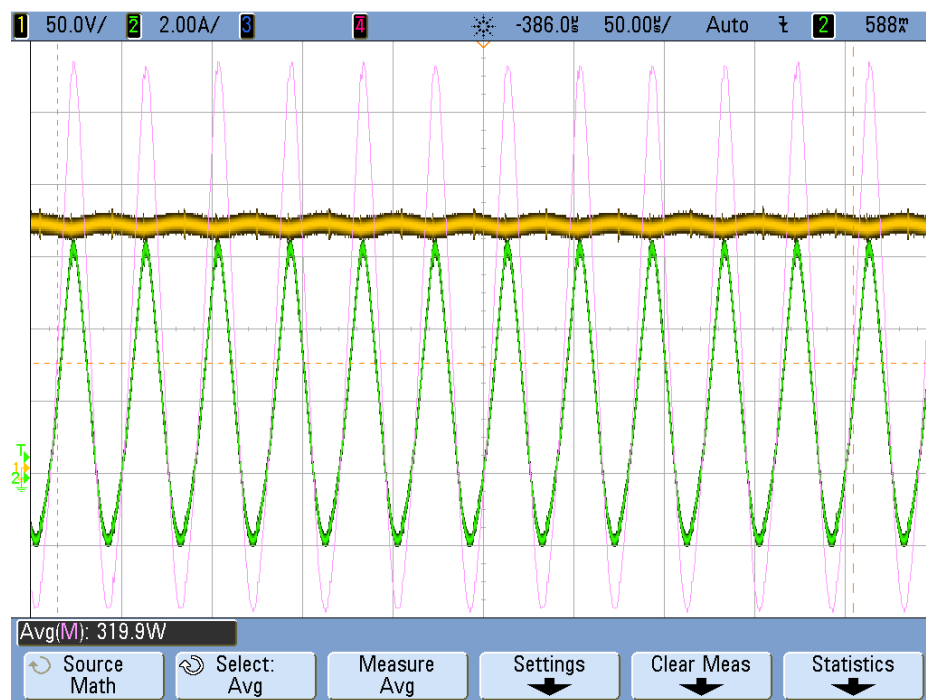


Figura 56. Estimación de la potencia de entrada al sistema para una carga de material ferromagnético y con señal de control modulada de 40 pulsos a 25 MHz, ciclo de trabajo de 55% y señal de conmutación de 25 KHz, ciclo de trabajo 40%.

Salida

La Figura 57 corresponde a la tensión y la corriente medida en la carga formada por la bobina de inducción y el recipiente de material ferromagnético, para el caso de la señal de control modulada especificada. En azul podemos ver la tensión de la carga y en rojo tenemos la corriente de la carga. En color morado tenemos la estimación de la señal de potencia consumida por esta carga, cuyo valor se ha calculado en el osciloscopio y nos muestra 307,7 W.

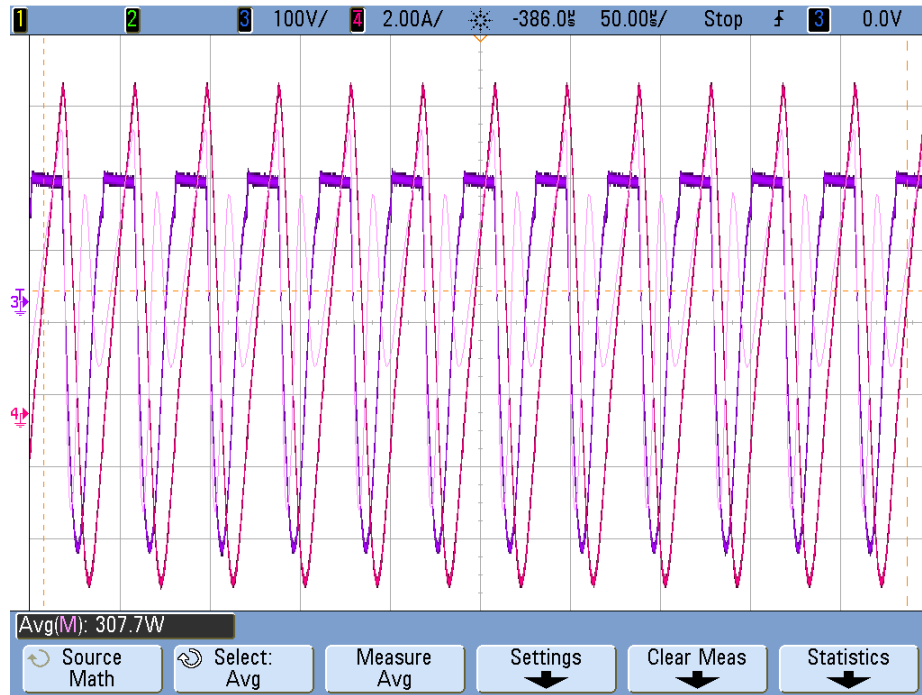


Figura 57. Estimación de la potencia entregada por el sistema hacia una carga de material ferromagnético y con señal de control modulada de 40 pulsos a 25 MHz, ciclo de trabajo de 55% y señal de conmutación de 25 KHz, ciclo de trabajo 40%.

Análisis de Eficiencia

$$\eta_{(\%)} = \frac{P_{salida}}{P_{entrada}} \cdot 100\%$$

$$\eta_{(\%)} = \frac{307,7 \text{ W}}{319,9 \text{ W}} \cdot 100\%$$

$$\eta_{(\%)} = 96,2 \%$$

4.5.3 Potencia del sistema con señal de control no modulada y recipiente de aluminio

Señal de 100 KHz con ciclo de trabajo de 50%. Tensión de bus de 170 V.

Entrada

La Figura 58 corresponde a la tensión y la corriente medidas desde la fuente hacia el circuito driver cuando se ha calentado un recipiente de aluminio y se ha utilizado una señal de control no modulada. En amarillo podemos ver la tensión de bus, la cual se ha establecido en 170V DC y en verde tenemos la corriente entregada. En color morado tenemos la estimación de la señal de

potencia entregada por esta fuente, cuyo valor se ha calculado en el osciloscopio y nos muestra 208,9 W.

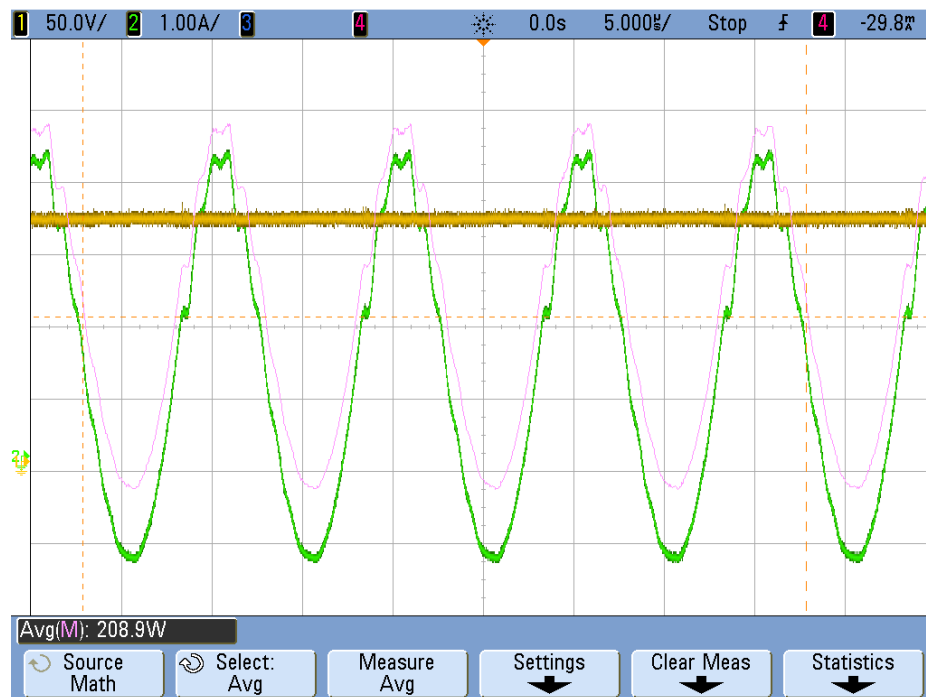


Figura 58. Estimación de la potencia de entrada al sistema para una carga de aluminio y con señal de control no modulada de 100 KHz, ciclo de trabajo 50%.

Salida

La Figura 59 corresponde a la tensión y la corriente medida en la carga formada por la bobina de inducción y el recipiente de aluminio, para el caso de la señal de control especificada. En azul podemos ver la tensión de la carga y en rojo tenemos la corriente de la carga. En color morado tenemos la estimación de la señal de potencia consumida por esta carga, la misma que se ha calculado en el osciloscopio y nos muestra un valor de 170 W.

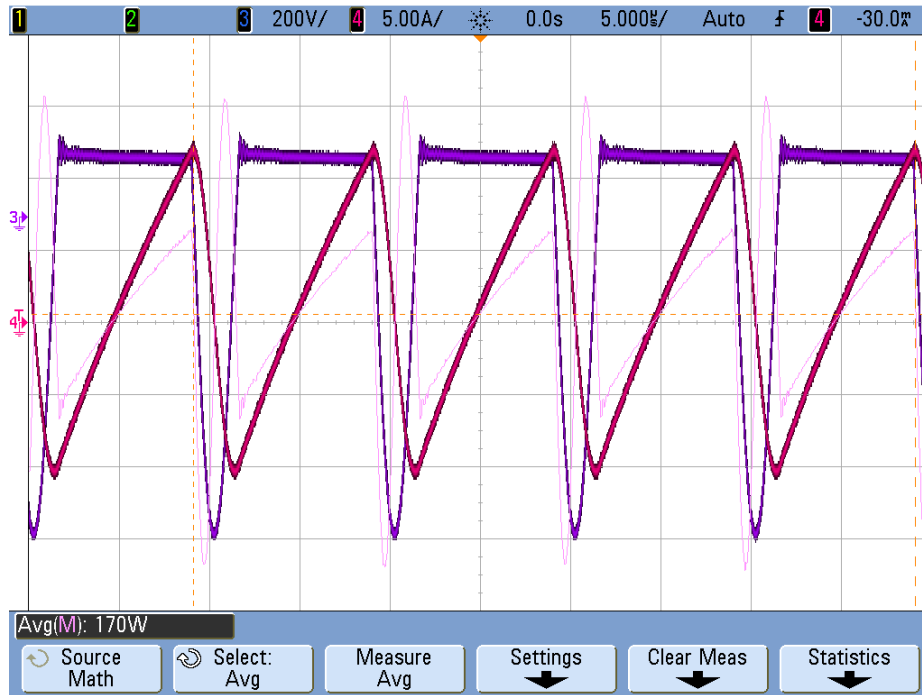


Figura 59. Estimación de la potencia entregada por el sistema hacia una carga de aluminio y con señal de control no modulada de 100 KHz, ciclo de trabajo 50%.

Análisis de Eficiencia

$$\eta_{(\%)} = \frac{P_{salida}}{P_{entrada}} \cdot 100\%$$

$$\eta_{(\%)} = \frac{170 \text{ W}}{208,9 \text{ W}} \cdot 100\%$$

$$\eta_{(\%)} = 81,4 \%$$

4.5.4 Potencia del sistema con señal de entrada modulada y recipiente de aluminio

Señal modulada de 20 pulsos a 25 MHz con ciclo de trabajo 55% y señal de conmutación de 100 KHz con ciclo de trabajo del 50%. Tensión de bus de 170 V.

Entrada

La Figura 60 corresponde a la tensión y la corriente medidas desde la fuente hacia el circuito driver cuando se ha utilizado un recipiente de aluminio y una señal de control modulada de 40 pulsos a 25 MHz, ciclo de trabajo de 55% y señal de conmutación de 100 KHz ciclo de trabajo 50%. En amarillo podemos ver la tensión de bus, la cual se ha establecido en 170V DC y en verde tenemos

la corriente entregada. En color morado tenemos la estimación de la señal de potencia entregada por esta fuente, cuyo valor se ha calculado en el osciloscopio y nos muestra 194,2 W.

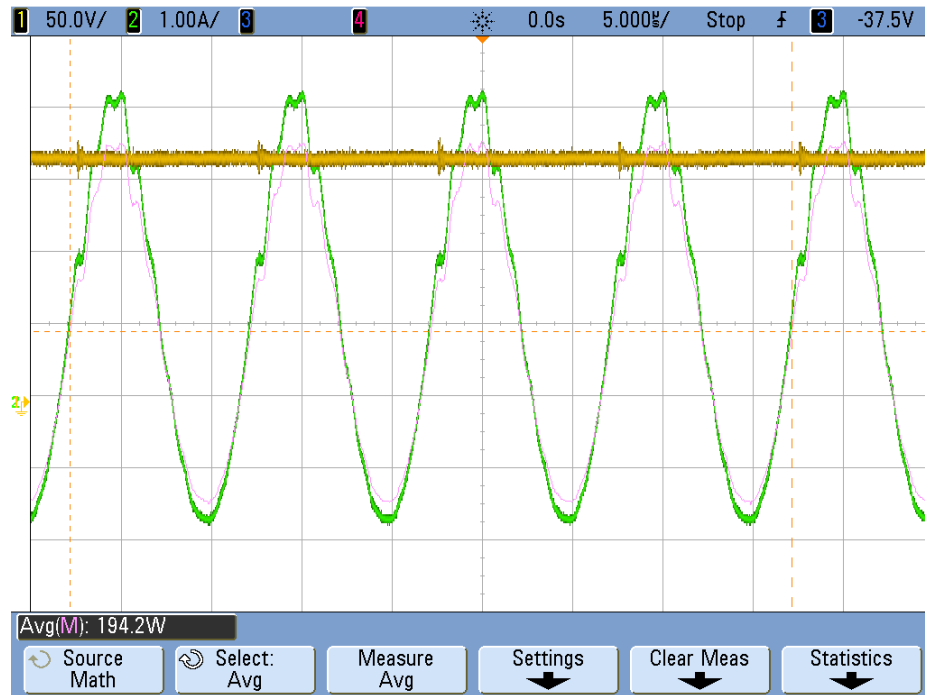


Figura 60. Estimación de la potencia de entrada al sistema para una carga de aluminio, con señal de control modulada de 20 pulsos a 25 MHz, ciclo de trabajo de 55% y señal de conmutación de 100 KHz, ciclo de trabajo 50%.

Salida

La Figura 61 corresponde a la tensión y la corriente medida en la carga formada por la bobina de inducción y el recipiente de aluminio, para el caso de la señal de control modulada especificada. En azul podemos ver la tensión de la carga y en rojo tenemos la corriente de la carga. En color morado tenemos la estimación de la señal de potencia consumida por esta carga, cuyo valor se ha calculado en el osciloscopio y nos muestra 154 W.

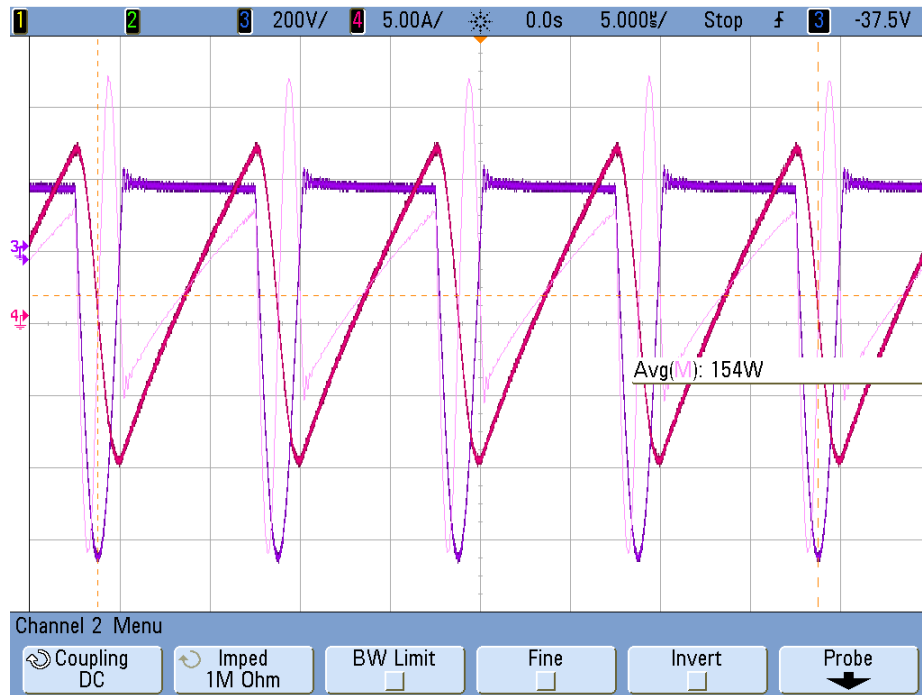


Figura 61. Estimación de la potencia entregada por el sistema hacia una carga de aluminio, con señal de control modulada de 20 pulsos a 25 MHz, ciclo de trabajo de 55% y señal de conmutación de 100 KHz, ciclo de trabajo 50%.

Análisis de Eficiencia

$$\eta_{(\%)} = \frac{P_{salida}}{P_{entrada}} \cdot 100\%$$

$$\eta_{(\%)} = \frac{154 \text{ W}}{194,2 \text{ W}} \cdot 100\%$$

$$\eta_{(\%)} = 79,3 \%$$

4.6 Distribución de Temperatura sobre los Componentes del Sistema en los Diferentes Casos de Operación

En este apartado se ha utilizado una cámara termográfica para captar los niveles de la temperatura que irradian o disipan los elementos del sistema. Las capturas se han hecho cuando el sistema trabaja con recipiente ferromagnético y cuando se utiliza un recipiente de aluminio; en ambas configuraciones se capturó la temperatura para los casos particulares en que la señal de control es no modulada o modulada.

4.6.1 Temperatura del sistema con señal de control no modulada y carga de recipiente ferromagnético

Señal de control de 23 KHz y ciclo de trabajo 30%

Se ha empezado con todos los elementos a temperatura ambiente y se ha puesto en funcionamiento el sistema. Se ha esperado a que el recipiente alcance una temperatura superior a los 80°C y se ha procedido a capturar las variaciones de temperatura de los elementos del circuito driver. En la Figura 62 tenemos la distribución de la temperatura sobre la superficie de contacto entre el recipiente ferromagnético y la bobina de inducción. En ese instante de la captura de la imagen, la base del recipiente ferromagnético estaba a una temperatura máxima de 85°C.

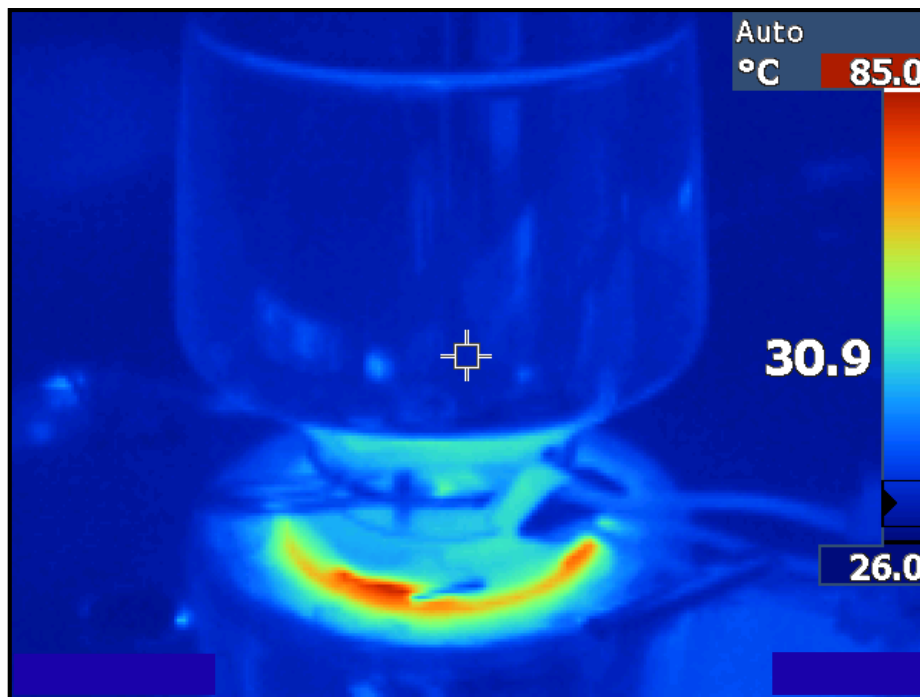


Figura 62. Distribución de temperatura en la superficie de contacto entre el recipiente ferromagnético y la bobina de inducción.

A continuación, en la Figura 63 tenemos la distribución de temperatura sobre el circuito driver cuando este se encuentra en pleno funcionamiento con una señal de control no modulada y controlando el calentamiento de un recipiente ferromagnético. En esta prueba se puede ver que, el elemento que disipa más calor es el transistor SiC, tomando el valor máximo de 66°C;

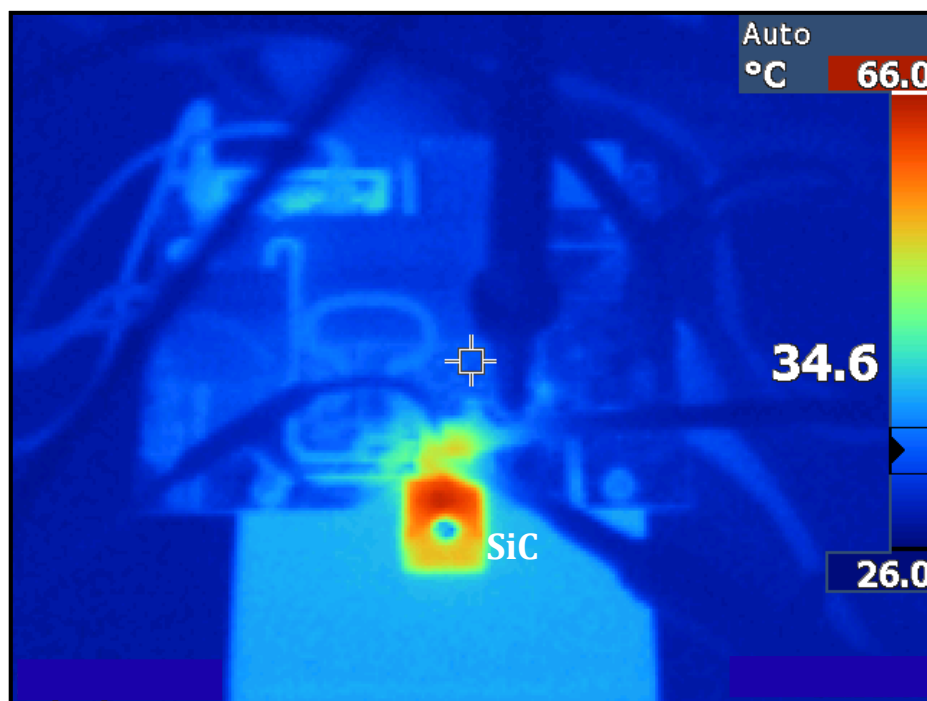


Figura 63. Distribución de temperatura sobre los elementos del circuito driver, trabajando con señal de control no modulada y con recipiente ferromagnético.

4.6.2 Temperatura del sistema con señal de control modulada y carga de recipiente ferromagnético

Señal modulada de 20 pulsos a 25 MHz con ciclo de trabajo 55% y señal de conmutación de 23 KHz con ciclo de trabajo del 30%

En la Figura 64 tenemos la distribución de temperatura sobre el circuito driver cuando este se encuentra en pleno funcionamiento con una señal de control modulada y controlando el calentamiento de un recipiente ferromagnético. En esta prueba se puede ver que, el elemento que disipa más calor es el transistor SiC, tomando el valor máximo de 45°C; pero también es visible un punto de calor similar en el driver, que comparándolo con la escala, podríamos decir que está cerca del valor máximo de temperatura de esta prueba (45°C). Adicionalmente, en esta imagen se observa que el elemento TRACO también está disipando calor, pero con una temperatura que en esta escala no superaría los 40 °C.

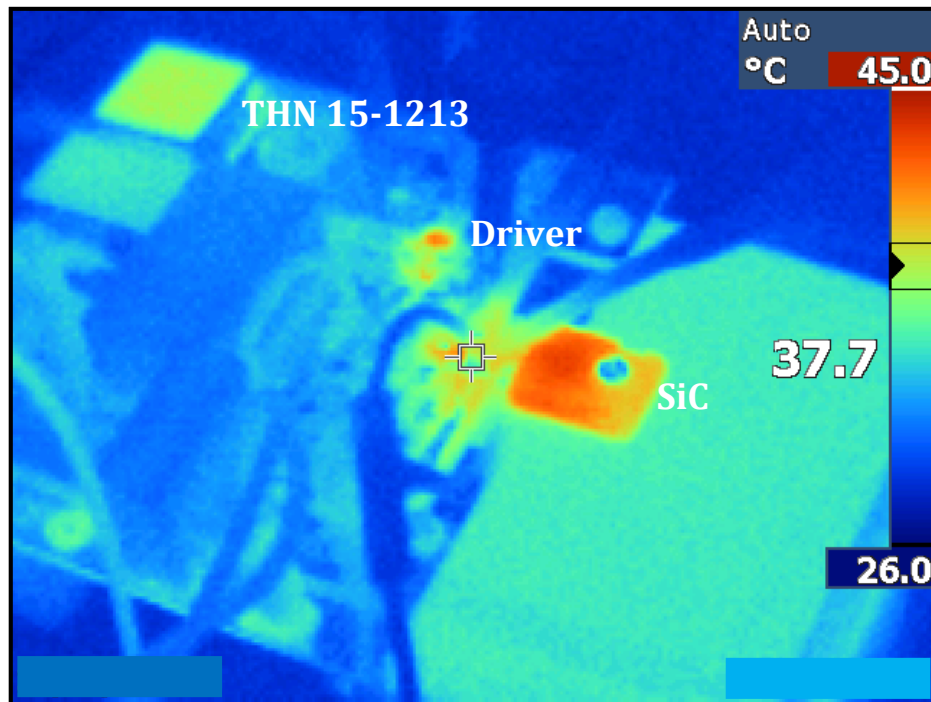


Figura 64. Distribución de temperatura sobre los elementos del circuito driver, trabajando con señal de control modulada y con recipiente ferromagnético.

4.6.3 Temperatura del sistema con señal de control no modulada y recipiente de aluminio

Señal de control de 100 KHz y ciclo de trabajo 50%

En la Figura 65 se puede observar la distribución de la temperatura sobre la superficie de contacto entre el recipiente de aluminio y la bobina de inducción.

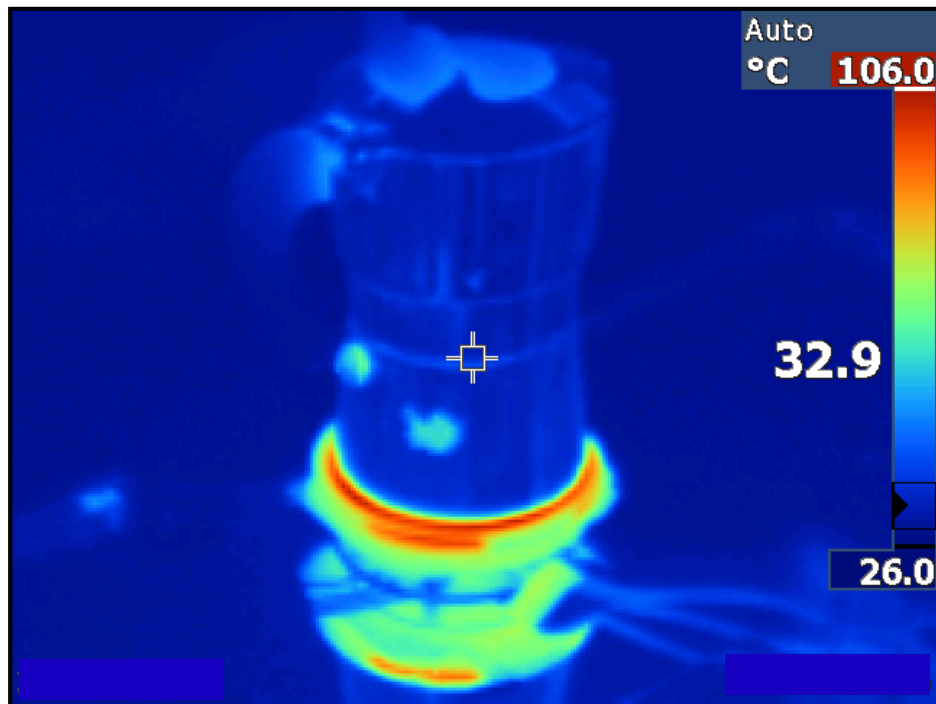


Figura 65. Distribución de temperatura en la superficie de contacto entre el recipiente de aluminio y la bobina de inducción.

En la Figura 66 se presenta la distribución de temperatura sobre el circuito driver cuando este se encuentra en pleno funcionamiento con una señal de control no modulada y el recipiente de aluminio sobre la bobina de inducción. En este caso se observa que, el elemento que disipa más calor es el transistor SiC, pero con una temperatura inferior al caso de operación con recipiente ferromagnético y señal de control no modulada. Ahora también es visible la disipación de calor por parte del driver; pero tomando en cuenta la escala podríamos decir que su temperatura no supera los 40 °C.

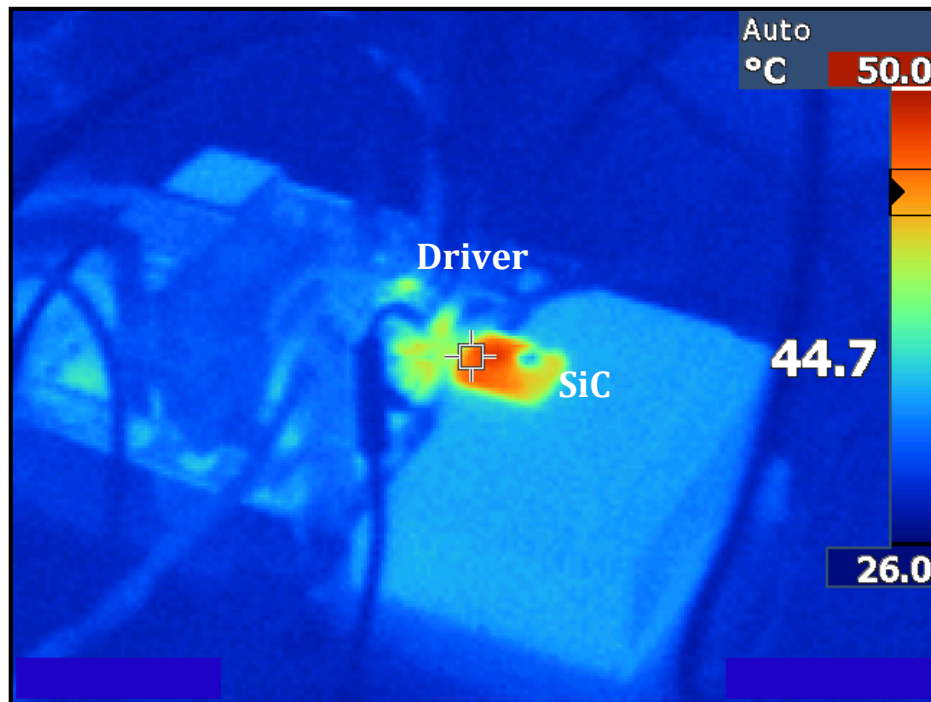


Figura 66. Distribución de temperatura sobre los elementos del circuito driver, trabajando con señal de control no modulada y con recipiente de aluminio.

4.6.4 Temperatura del sistema con señal de control modulada y recipiente de aluminio

Señal modulada de 20 pulsos a 25 MHz con ciclo de trabajo 55% y señal de conmutación de 100 KHz con ciclo de trabajo del 50%

En la Figura 67 podemos observar la distribución de temperatura sobre el circuito driver cuando este se encuentra en pleno funcionamiento con una señal de control modulada y controlando el calentamiento de un recipiente de aluminio. En esta prueba se puede ver que, el elemento que disipa más calor es el driver, tomando el valor máximo de 51°C; también es visible que el transistor SiC está disipando una temperatura cercana a la del driver pero inferior según la escala. Adicionalmente, en esta imagen se observa que el elemento TRACO también está disipando calor, pero con una temperatura inferior a los otros dos elementos analizados.



Figura 67. Distribución de temperatura sobre los elementos del circuito driver, trabajando con señal de control modulada y con recipiente de aluminio.

5 CONCLUSIONES

Al finalizar este trabajo hemos alcanzado los objetivos planteados, ya que se ha construido un circuito driver que cumple con los criterios de diseño y construcción necesarios para manejar los niveles de corriente y tensión de un sistema de calentamiento por inducción, así como la potencia asociada a estos parámetros.

Se han encontrado los puntos de trabajo en los cuales el sistema presta mejor eficiencia al calentar un recipiente de material ferromagnético, así como también para un recipiente de aluminio. Estos puntos de trabajo se han logrado experimentalmente modificando la señal de control del driver tanto en frecuencia como en modulación de tal manera que den la mayor eficiencia posible.

Al comparar los resultados de operación con señal de control no modulada y señal modulada con pulsos iniciales de frecuencia mayor a la de conmutación, se ha observado que disminuyen los picos de corriente con la señal modulada, pudiendo así el sistema manejar mayor potencia que en el caso de una señal de control no modulada.

En base a la experimentación hemos encontrado que para el recipiente de material ferromagnético obtenemos el mejor rendimiento y la mejor eficiencia cuando la señal de control del circuito driver es una modulada de 40 pulsos a 25 MHz, con ciclo de trabajo del 55% y señal de conmutación de 23 KHz con ciclo de trabajo del 30%.

Para el caso del recipiente de aluminio, hemos encontrado que obtenemos el mejor rendimiento y la mejor eficiencia cuando la señal de control del circuito driver es una no modulada de 100 KHz con ciclo de trabajo del 50%.

Al analizar la distribución de temperatura de los elementos del circuito driver desarrollado, nos encontramos que, para el caso del recipiente ferromagnético presentan menor calentamiento cuando se utiliza una señal de control modulada ya que la estar en un punto de trabajo no óptimo, si no modulamos se presentan picos de corriente que exigen a los elementos, principalmente al transistor.

Para el caso del recipiente de aluminio, vemos que los elementos del circuito presentan temperaturas más bajas cuando se utiliza una señal de control no modulada, ya que, al estar en un punto de trabajo óptimo, no hay picos de corriente en la conmutación y por ende la modulación es innecesaria y en cierta medida, contraproducente. Es que, cuando se aplica dicha modulación, el driver debe realizar mayor cantidad de cambios de nivel y por ello en este caso, el elemento en cuestión es el que más temperatura disipa.

6 TRABAJOS FUTUROS

Dados los alcances del actual trabajo, como trabajo futuro se ha pensado en la necesidad de crear un sistema que sea capaz de reconocer el material del recipiente y conforme a ello cambiar la frecuencia de operación. Además, debería ser capaz de seleccionar condensadores de diferentes capacitancias para el circuito de resonancia. Si se logra lo expuesto, se podría conseguir siempre la mayor eficiencia independientemente del tipo de material que se quiera calentar.

7 REFERENCIAS

Amrhein, A., & Lai, J. S. J. (2015, June). A transformer-coupled, series-resonant topology for the induction heating of aluminum cookware. In *2015 9th International Conference on Power Electronics and ECCE Asia (ICPE-ECCE Asia)* (pp. 1234-1239). IEEE.

Carpio, F. (2018). *Estudio para el diseño de un driver aplicado en inversores para cocinas de inducción* (trabajo Final de Master). Universidad Politécnica de Cataluña.

Dankov, D. D., & Prodanov, P. I. (2017, September). Analysis and design of quasi-resonant ZVS inverter for induction heating in a magnetic circuit. In *2017 XXVI International Scientific Conference Electronics (ET)* (pp. 1-7). IEEE.

DOE, U. (1998). Technical Support Document for Residential Cooking Products, Vol. 2: Potential Impact of Alternative Efficiency Levels for Residential Cooking Products. U.S. Department of Energy.

Galili, I., Kaplan, D., & Lehavi, Y. (2006). Teaching Faraday's law of electromagnetic induction in an introductory physics course. *American journal of physics*, 74(4), 337-343.

León, J. (2011). *Caracterización y Optimización de una etapa ZVS de Silicio* (Proyecto de Fin de Carrera). Universidad de Zaragoza.

Llorente, S., Monterde, F., Burdio, J. M., & Acero, J. (2002). A comparative study of resonant inverter topologies used in induction cookers. In *APEC. Seventeenth Annual IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition (Cat. No. 02CH37335)* (Vol. 2, pp. 1168-1174). IEEE.

Lucía, O., Maussion, P., Dede, E. J., & Burdío, J. M. (2013). Induction heating technology and its applications: past developments, current technology, and future challenges. *IEEE Transactions on industrial electronics*, 61(5), 2509-2520.

Millan, I., Puyal, D., Burdio, J. M., Acero, J., & Llorente, S. (2007, June). Resonant inverter topology for all-metal domestic induction heating. In *2007 IEEE International Symposium on Industrial Electronics* (pp. 913-918). IEEE.

Plonus, M. A. (1994). Electromagnetismo aplicado. Reverte.

Quiceno, D. E. G. (2011). La ley de Ampere y sus dificultades conceptuales: un análisis histórico epistemológico. *Revista científica*, 1(13), 79-83.

Semiconductor, O. (2014, octubre). Induction Cooking Everything You Need to Know. *Phoenix, Estados Unidos, AND9166/D*.

Semiconductor, O. (2014, noviembre). Driving and Layout Design for Fast Switching Super-Junction MOSFETs. *AN-9005*.

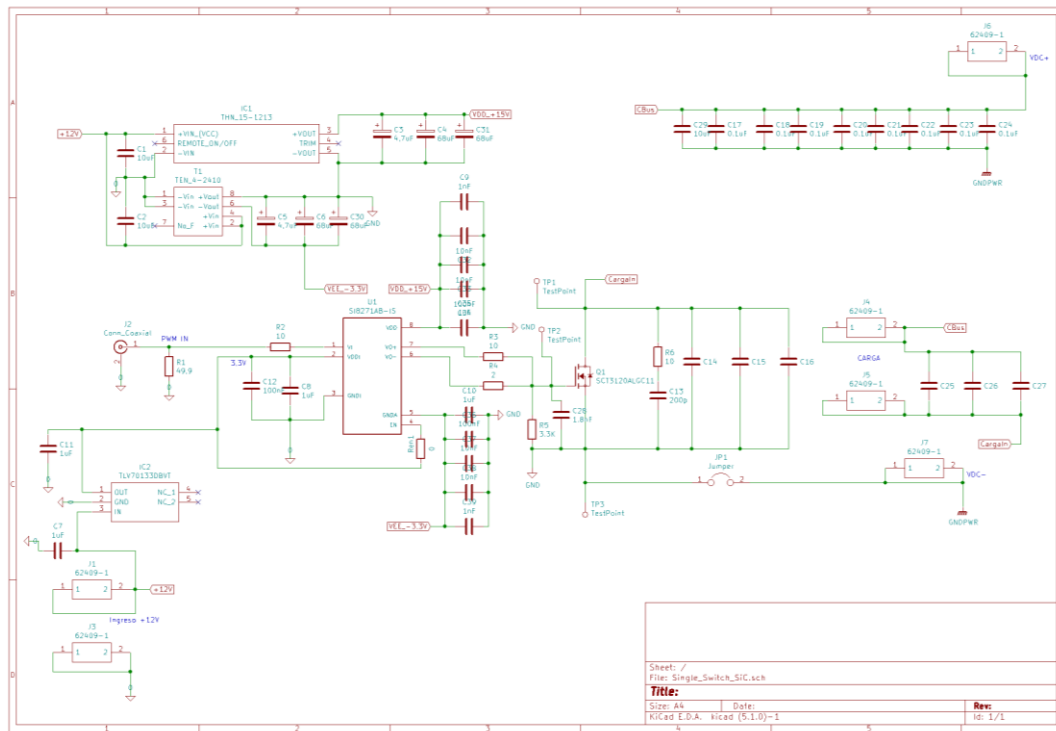
Semiconductor, O. (2015). The Effect of Pan Material in an Induction Cooker. *Rev.0. AND9201/D*.

Skała, A., & Waradzyn, Z. (2016). Determination of efficiency in a single-switch class E ZVS-1S quasi-resonant inverter in application for induction heating. *Przegląd Elektrotechniczny*, 92(3), 99-102.

Vincent, M. (2007). Induction cooking-New challenges for SH Tiny MCU.

8 ANEXOS

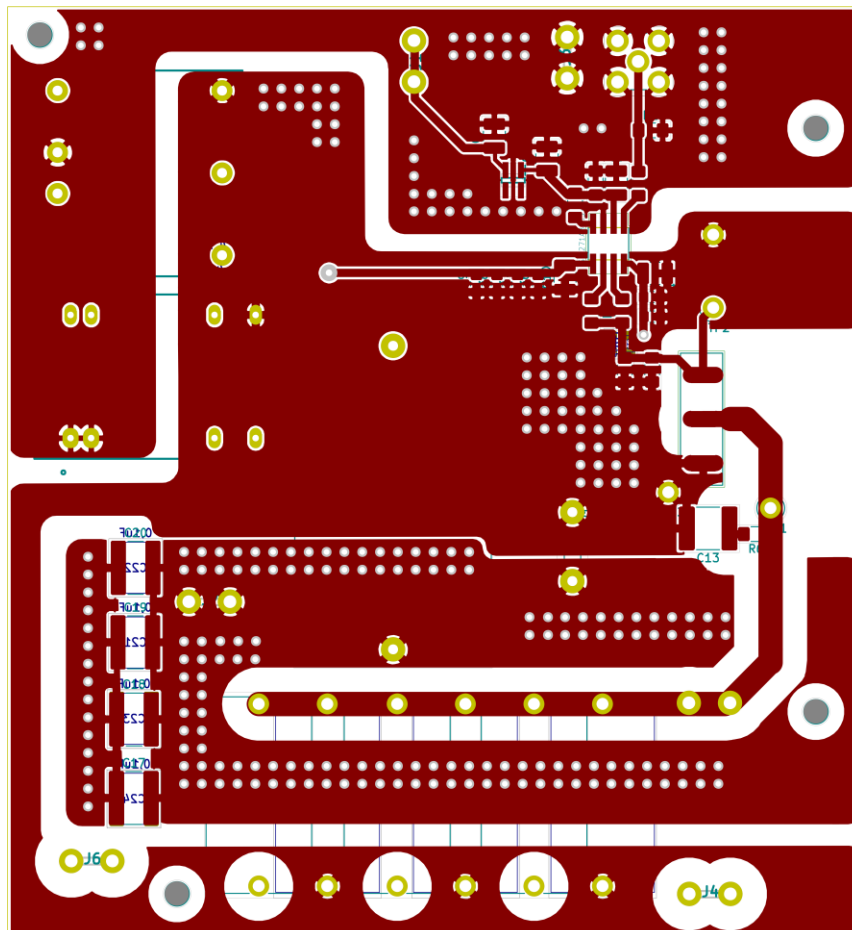
8.1 Esquemático del diseño de la PCB



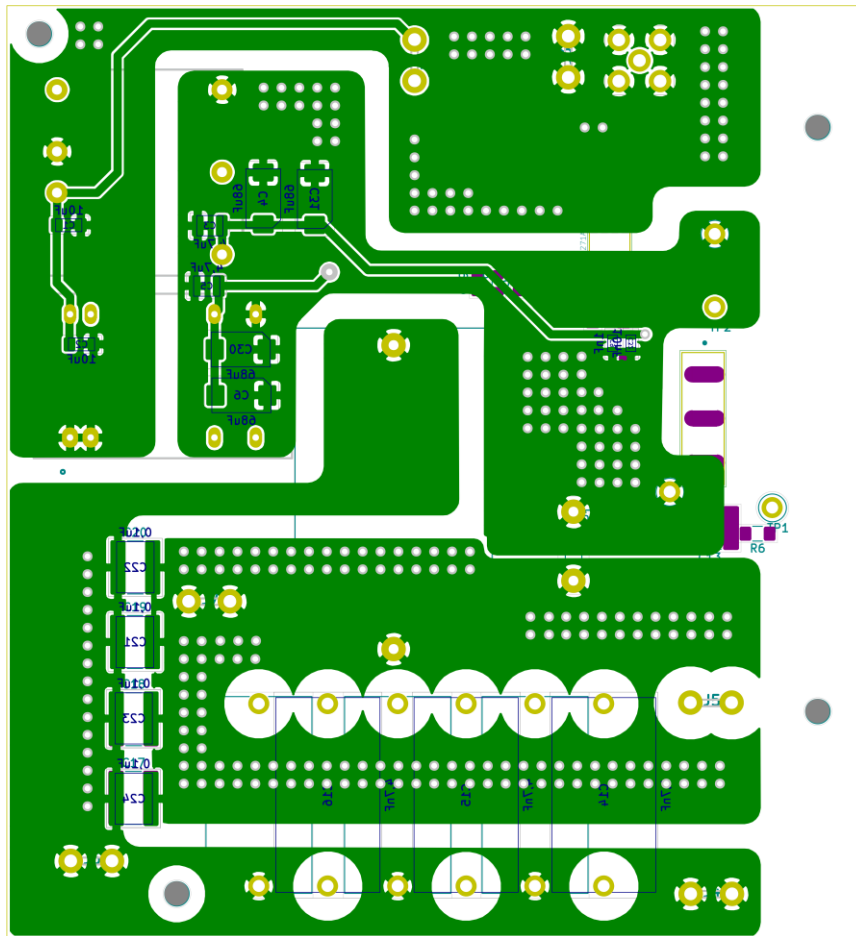
8.2 Listado de Componentes del Circuito Desarrollado

Denominación en Esquemático	Valor	Especificación	Cantidad
C1, C2	10uF	Capacitor_SMD:C_1206	2
C3, C5	4,7uF	Capacitor_SMD:C_1210	2
C4, C6, C30, C31	68uF	Capacitor_Tantalum_SMD:2.25x2.55mm	4
C7, C8, C10, C11, C35	1uF	Capacitor_SMD:C_1210	5
C12	100nF	Capacitor_SMD:C_1206	1
C13	200p	Capacitor_SMD:C_2220	1
C14-C16, C25-C27	4,7nF	Capacitor_THT:C_Rect_L24.0mm_W12.8mm_P22.50mm	6
C17-C24	0,1uF	Capacitor_SMD:C_1825	8
C28	1,8nF	Capacitor_SMD:C_1206	1
C29	10uF	Capacitor_THT:C_Rect_L41.5mm_W24.0mm_P37.50mm	1
C34, C36	100nF	Capacitor_SMD:C_0805	2
C32, C33, C37, C38	10nF	Capacitor_SMD:C_0805	4
C9, C39	1nF	Capacitor_SMD:C_0805	2
IC1	THN15-1213	Convertidor DC-DC	1
IC2	TLV70133DB VT	Regulador	1
J1, J3-J7	62409-1		6
J2	Con. Coaxial	Connector_Coaxial:SMB_Jack_Vertical	1
JP1	Jumper	current_shunt:SolderJumper	1
Q1	SCT3120ALG C11		1
R1	49,9	Resistor_SMD:R_1206	1
R2, R3, R6	10	Resistor_SMD:R_1206	3
R4	2	Resistor_SMD:R_1206	1
R5	3,3K	Resistor_SMD:R_1206	1
Ren1	0	Resistor_SMD:R_1206	1
T1	TEN 4-2410	Convertidor DC-DC	1
TP1-TP3	TestPoint	TestPoint	3
U1	SI8271AB-IS	Driver	1

8.3.1 Capa Superior



8.3.2 Capa Inferior



8.4 Código Matlab para la generación de señales de control

```
clear all;
close all;

% Parámetros de modulación:
fc=25e6;           % Frecuencia portadora.
fm=100e3;          % Frecuencia de conmutación.
Delta_f=0;         % Máxima variación de la frecuencia fc.

Tm=1/fm;           % Periodo de conmutación.

% Parámetros de la señal:
A=18.3;            % Amplitud de la señal portadora [Vp].
P=20; % n° de pulsos modulados.

Dc1=0.5;
Dc2=0.6;
D=0.5; %Ciclo de trabajo.

t=0:1/fc:(P-1)/fc;
vm_1=zeros(1,P);
%Perfil rampa
a1=fc/P;
b1=-0.5;
for k=1:P
    vm_1(k)=a1*t(k)+b1;
end

fi_1=fc+Delta_f*vm_1;

Tmod=1./fi_1;

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
% Dominio temporal
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
H1 = zeros(1,P);

Taux1=Tmod;

for k=2:1:P
    H1(k)=sum(Taux1(1:1:k-1));
    %H1(k)=1/fc*(k-1);
end;

Taux1=round(Taux1*200e6)/200e6;

H1=round(H1*200e6)/200e6;
```

```

%Calculo de las señales moduladas:

fsample=1/5e-9; % frecuencia de muestreo (frec sample max
generador TABOR 200 MHz).
t1=0:1/fsample:Tm-1/fsample;
s1=0;
for k=1:2:P-1
    s1=s1+A*(escalon(H1(k),t1)-escalon(H1(k)+Taux1(k)*Dc1,t1));
end
for k=2:2:P
    s1=s1+A*(escalon(H1(k),t1)-escalon(H1(k)+Taux1(k)*Dc2,t1));
end
% s1=s1+A*(escalon(sum(Taux1),t1)-
escalon((sum(Taux1))+(D*Tm+sum(Taux1)),t1));
s1=s1+A*(escalon(sum(Taux1),t1)-escalon((sum(Taux1))+(D*Tm),t1));
% s1=s1+A*(escalon(30/fc,t1)-
escalon((sum(Taux1))+(D*Tm+sum(Taux1)),t1));

% Gráficas:
figure(1) % Gráfica del perfil de modulación.
hold on;
plot(t,vm_1,'bo'), grid on

figure(2) % Gráfica del patrón de conmutación.
plot(t1,s1,'b'), hold on

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%Creación del fichero V_driver.txt --Simulación LTSPICE
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%

% fid = fopen ('V_driver.txt', 'w');
% L=length(s1);
% N=20; %Número de periodos de conmutación.
% for n=1:N
%     for i=1:L
%         fprintf (fid,'%d      %d\n', (n-1)*t1(L)+t1(i),s1(i));
%     end;
% end;
% fclose (fid);

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%Creación del fichero V_gen.txt --Generador TABOR
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%

fid = fopen ('V_gen_mod_55_20_pulsos_100kHz_50%.txt', 'w');
%fid = fopen ('V_gen_sinmodular_30%.txt', 'w');
L=length(s1)
for i=1:L
    fprintf (fid,'%d      %d\n',t1(i),((s1(i))/A));
end;
fclose (fid);

```

